

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»

В.Л. Шатохин, В.П. Шестак

ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА

Лабораторный практикум

Москва 2010

УДК 621.52(076.5)

ББК 31.77я7

Ш 28

Шатохин В.Л., Шестак В.П. **Вакуумная техника. Лабораторный практикум:** Учебно-методическое пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 84 с.

Данное пособие содержит описание и методические указания к выполнению лабораторных работ, охватывающих основные разделы курса «Вакуумная техника» – построение вакуумных систем и расчет их параметров, изучение средств откачки, диагностика состояния вакуумной среды, регистрация газовых потоков.

Предназначено для студентов старших курсов физических специальностей.

Рецензент канд. тех. наук А.Е. Новожилов

Рекомендовано к изданию редсоветом НИЯУ МИФИ
в качестве учебно-методического пособия

ISBN 978-5-7262-1255-5

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2010

РАБОТА 1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

Цель – получить представление о характерных особенностях работы вакуумной системы, включающей низко- и высоковакуумный насосы, оценить влияние на работу вакуумной системы процессов газовой выделенности и протекания, нагрева вакуумной системы; освоить методику работы с моделирующей программой; научиться проводить анализ зависимостей изменения давления от времени и режимов откачки; уметь выбирать средства откачки, обеспечивающие получение требуемого вакуума в системе.

ВВЕДЕНИЕ

Откачка вакуумной системы

Вакуумной системой называется совокупность взаимосвязанных устройств для получения и поддержания вакуума, приборов для вакуумных измерений, а также откачиваемых объемов (камер) и связывающих их вакуумных трубопроводов.

Откачка вакуумной системы заключается в уменьшении молекулярной концентрации или количества молекул (снижении давления газа) до уровня, обеспечивающего проведение физических исследований или вакуумных технологических процессов.

Уменьшение количества молекул газа в системе осуществляется с помощью устройств для получения и поддержания вакуума (средств откачки) – *вакуумных насосов*, удаляющих или поглощающих газ из вакуумной системы.

Течение газа в вакуумной системе характеризуется *потоком газа* – количеством газа, выраженным в единицах давления и объема, пересекающего поперечное сечение вакуумной системы в единицу времени: $Q = p \cdot V$, Па·м³.

Работа вакуумных насосов создает в вакуумной системе направленное движение молекул – поток откачки, определяемый скоростью, с которой уменьшается давление в вакуумной системе постоянного объема:

$$Q = -\frac{d(pV)}{dt} = -V \cdot \frac{dp}{dt}, \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}, \quad (1.1)$$

где V – объем вакуумной системы, м^3 ; p – давление в системе, Па; t – текущее время, с. Знак минус указывает на то, что давление уменьшается (минус может быть отнесен и к потоку откачки, в этом случае он указывает на направление потока откачки – из вакуумного объема).

Согласно выражению (1.1) в вакуумной системе можно получить сколь угодно низкое давление при постоянном потоке откачки. Однако реально **существует нижний предел по давлению**, ниже которого откачка системы невозможна. Это так называемое *предельное остаточное давление* $p_{\text{ПРЕД}}$, которое может быть достигнуто в определенных условиях при использовании конкретных средств откачки. Причина данного явления состоит в том, что скорость изменения количества газа в вакуумной системе зависит от соотношения потоков поступающего в систему газа $Q_{\text{ВХ}}$ и собственно откачки $Q_{\text{ОТК}}$: $Q = Q_{\text{ОТК}} - Q_{\text{ВХ}}$.

Поступающий в систему газ определяется качеством изготовления вакуумной системы, то есть величинами *потоков натекания* $Q_{\text{Т}} = \sum Q_{\text{Т}j}$ из атмосферы и *потоков газовыделения* $Q_{\text{ГВ}} = \sum Q_{\text{ГВ}j}$ сорбированных газов с внутренних поверхностей, где j – индекс суммирования потоков натекания и газовыделения при наличии нескольких источников. *Натекание*, т.е. проникновение газа из атмосферы в вакуумную систему, происходит из-за наличия вакуумных неплотностей – течей, технологических погрешностей в изготовлении вакуумных оболочек. Другим источником газовых нагрузок является *газовыделение* – выделение газа из материала в объем вакуумной системы (самопроизвольное), величина которого зависит от используемых материалов и качества их очистки (обезгаживания).

При достижении предельного остаточного давления в вакуумной системе устанавливается **режим динамического квазиравновесия**. Насос продолжает работать, в системе существуют установившиеся потоки молекул, поток откачки определяется суммарным потоком газовой нагрузки: $Q_{\text{ОТК}} = Q_{\text{ВХ}}$. Количество молекул и давление в вакуумной системе практически не изменяются, так как $Q = 0$ и $dp/dt = 0$ (см. уравнение 1.1).

Мера эффективности откачки вакуумной системы – *быстрота откачки насоса* S , м³/с, определяемая как объем газа, проходящий через поперечное сечение элементов вакуумной системы в единицу времени при фиксированном давлении. При этом поток газа будет равен $Q_{\text{отк}} = S \cdot p$. Для стационарного газового потока такое соотношение будет выполняться для любого k -го сечения и соответствующим этому сечению величинам давления и быстроты откачки: $Q_{\text{отк}} = S_k \cdot p_k = S \cdot p$.

Таким образом, выражение (1.1) принимает вид

$$p \cdot S - Q_{\text{T}} - Q_{\text{ГВ}} = -V \cdot \frac{dp}{dt}. \quad (1.2)$$

Подобное уравнение, называемое также *уравнением откачки*, может быть записано и для парциальных давлений газов – p_i , составляющих остаточный газ в вакуумной системе. Сама же величина получаемого в вакуумной системе **предельного остаточного давления** будет зависеть от количественных характеристик выбранных вакуумных насосов и качества изготовления вакуумной системы:

$$p_{\text{пр}} = (Q_{\text{T}} + Q_{\text{ГВ}}) / S. \quad (1.3)$$

Другим фактором, препятствующим получению в откачиваемой системе низкого давления, может стать ограничение, связанное с самим вакуумным насосом. Любой насос в силу конструктивных особенностей характеризуется минимальной величиной давления – *предельным давлением насоса* p_0 , которое обеспечивается насосом без подключения откачиваемого объема. Этот параметр является одной из наиболее важных характеристик вакуумного насоса и указывается в его технических данных. Соответственно и при откачке вакуумной системы конкретным насосом **давление в системе не может быть получено ниже предельного давления данного насоса**.

Спектр масс остаточных газов в вакуумной системе

Любой вакуумный насос обладает селективностью откачки, то есть быстрота действия насоса различна по разным газам. Это приводит к тому, что за одно и то же время работы насос удаляет из системы различное количество разных газов. Следовательно, изме-

няются относительное содержание газов и масс-спектр смеси газов, оставшихся в системе в результате ее откачки. Так, для высоковакуумного диффузионного насоса быстрота действия связана с молекулярной массой откачиваемых молекул M соотношением

$$S_1/S_2 = \sqrt{M_2/M_1} . \quad (1.4)$$

При высоком вакууме газ, выделяющийся из материалов вакуумной системы, становится основным в остаточном газе. Вследствие этого остаточный газ по составу может значительно отличаться от атмосферного воздуха.

Массовый спектр остаточного газа в системе, таким образом, определяется:

- начальным составом газовой смеси;
- составом входящих газовых потоков натекания и газовыделения;
- типом используемого насоса и режимом его работы.

Очевидно, что вид масс-спектра постоянно изменяется в процессе откачки. Кроме того, он зависит и от мощности нагревателя диффузионного насоса, которая определяет скорость, плотность струи пара и соответственно быстроту действия насоса по разным газам.

Потоки натекания и газовыделения

Натекание обычно возникает в случае нарушения герметичности вакуумной системы. Чаще всего герметичность нарушается в местах разборных соединений. Для них величина возможного потока натекания принимается на уровне минимального потока, регистрируемого с помощью течеискателя (порядка $1 \cdot 10^{-12}$ Вт). Поскольку атмосферное давление всегда много больше, чем давление внутри вакуумной системы, то **величина потока натекания постоянна**, не зависит ни от давления в системе, ни от времени. Парциальный состав потока натекания соответствует парциальному составу атмосферного воздуха. Допустимым считается такой поток натекания, при котором возможно получение требуемого равновесного давления p в системе: $Q_{\text{Тдоп}} \leq k_3 \cdot p \cdot S$, где k_3 – коэффициент запаса по степени герметичности.

Иногда может наблюдаться так называемое **ложное натекание**, вызванное выходом газа из внутренних полостей и закрытых частей вакуумных элементов.

Газовыделение с внутренних поверхностей вакуумной системы существует всегда, однако величина потока обычно мала и поэтому принято учитывать потоки газовыделения только при рассмотрении условий в высоком вакууме.

Источниками газовыделения являются приповерхностные эффекты, связанные с присутствием сорбированных газов на поверхности материала и растворенных в самом материале. Выход этих газов с внутренней поверхности оболочки вакуумной системы и создает поток газовыделения. Величина такого потока определяется свойствами самого материала, его газонасыщенностью и состоянием поверхности. Чем чище поверхность и выше уровень ее обработки, тем меньше количество содержащегося на ней газа и ниже уровень газовыделения.

Процессы газовыделения можно интенсифицировать путем нагрева стенок вакуумной системы до температуры 250–650°C. Если при этом одновременно проводится откачка системы, то происходит процесс вакуумной температурной тренировки, приводящий к ускоренной очистке (обезгаживанию) поверхностей. Следовательно, наблюдается уменьшение общего числа молекул в системе, так как источники газовыделения имеют ограниченный ресурс по количеству молекул и потоки газовыделения уменьшаются со временем. Время очистки поверхности при ее прогреве до 450°C может составлять и минуты, но давление, достигаемое в системе, составит, к примеру, только 10^{-4} Па. Чтобы снизить давление до 10^{-6} Па, требуется несколько часов, а при желании получить в системе давление 10^{-8} Па необходима вакуумная температурная тренировка в течение сотни часов.

Уравнение откачки

В результате решения (интегрирования) уравнение (1.2) для полного давления будет получена зависимость вида

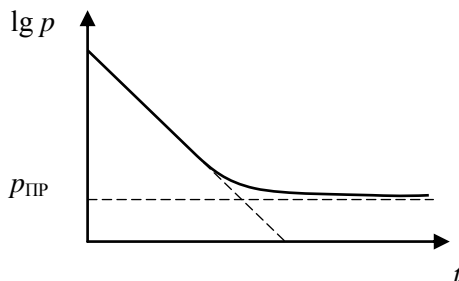
$$p(t) = \frac{Q_{\Sigma}}{S} + \left(p_{\text{нач}} - \frac{Q_{\Sigma}}{S} \right) \cdot e^{-t/\tau}, \quad (1.5)$$

где $Q_{\Sigma} = Q_{\text{ГВ}} + Q_{\text{Г}}$; $p_{\text{нач}}$ – начальное давление откачки; $\tau = V/S$. Аналогичные зависимости $p_i(t)$ могут быть получены и для каждого компонента газовой смеси. Параметр τ называется постоянной времени откачки и определяет скорость откачки из системы объемного газа (pV). Время откачки до заданного давления $p(t)$ будет равно

$$t = 2,3 \cdot \frac{V}{S} \cdot \lg \left(\frac{p_{\text{нач}} - Q_{\Sigma}/S}{p(t) - Q_{\Sigma}/S} \right). \quad (1.6)$$

Графики зависимостей $p(t)$ в полулогарифмическом масштабе (рис. 1.1) на начальном участке имеют вид прямых с углом наклона, определяемым τ . Чем меньше τ , тем резче падает давление.

При приближении давления к предельному остаточному давлению $p_{\text{ПР}}$ (1.3) скорость снижения давления уменьшается и, в пределе, давление остается практически постоянным (для конечного интервала времени).



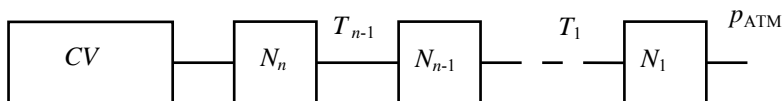
Р и с. 1.1. График откачки вакуумной системы в полулогарифмическом масштабе (при заданном значении скорости откачки S)

На практике зависимости $p(t)$ представляют собой экспериментальные графики откачки как для полного давления, так и для парциальных давлений. Реально эти графики получают, записывая значения давлений в фиксированные моменты времени.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

На рис. 1.2 показана вакуумная система, состоящая из откачиваемого объема CV , последовательности вакуумных насосов N_1 ,

N_2, \dots, N_n , соединенных трубопроводами T_1, T_2, \dots, T_n . Самый первый, низковакуумный насос выбрасывает газ, откачиваемый из системы, в атмосферу. Атмосферное давление обозначено $p_{\text{АТМ}}$.



Р и с. 1.2. Схема многоступенчатой вакуумной системы

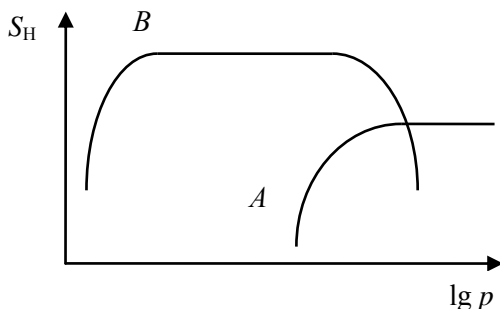
Число насосов в вакуумной системе определяет число ступеней откачки. Каждый из насосов предназначен для работы в определенном диапазоне давлений как на входе, так и на выходе насоса. Поэтому для обеспечения заданного перепада давлений между вакуумной камерой и атмосферой может потребоваться несколько насосов. Отметим, что некоторые типы насосов (механические, диффузионные, турбомолекулярные) сами по себе являются многоступенчатыми. Здесь, однако, мы это не учитываем.

Системы, предназначенные для получения низкого вакуума, как правило, состоят из одной ступени, которая обеспечивает выброс газа из откачиваемого объема непосредственно в атмосферу. Высоковакуумные установки состоят из двух, а иногда и трех ступеней откачки. В таких установках используются диффузионные, молекулярные и (или) сорбционные насосы. В установках для получения сверхвысокого вакуума на верхних ступенях откачки применяются некоторые типы магнеторазрядных насосов и криогенные агрегаты.

Одним из основных параметров, характеризующих возможности вакуумного насоса, является *быстрота действия насоса* S_n , определяемая как объем газа, удаляемый насосом во входном сечении в единицу времени при определенных давлении и температуре. Быстрота действия вакуумных насосов зависит от давления, для разных насосов эта зависимость различная. Будем считать, что $S_n = S_0 \cdot F(p)$, где S_0 – максимальное значение быстроты действия насоса; $F(p)$ – функция давления, наибольшее значение которой равно единице.

В лабораторной работе будут рассматриваться два типа насосов: механический вращательный и паромасляный диффузионный. Соответствующие им качественные зависимости $S_H(p)$ приведены на рис. 1.3.

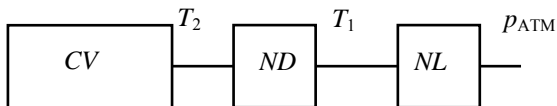
Рис. 1.3 иллюстрирует важную особенность высоковакуумных насосов: имея максимальную быстроту действия при давлениях порядка 10^{-1} – 10^{-4} Па, с увеличением давления они становятся крайне неэффективными. Более того, физические принципы, лежащие в основе работы этого насоса, не позволяют ему нормально функционировать при давлениях 10 Па и выше. Поэтому в качестве предварительной ступени откачки для диффузионного насоса используется механический вращательный насос, имеющий высокую производительность при давлениях, близких к атмосферному, и способный создать предварительное разрежение, достаточное для включения и работы диффузионного насоса.



Р и с. 1.3. Зависимости быстроты действия насосов от величины рабочего давления:
A — вращательный;
B — диффузионный

При одновременной работе двух насосов давление на входе низковакуумного насоса не должно превышать допустимую величину выходного давления для высоковакуумного насоса (принцип **согласования последовательно работающих насосов**).

Таким образом, рассматриваемая в работе вакуумная система является двухступенчатой (рис. 1.4.).



Р и с. 1.4. Моделируемая схема откачки

Управление этой системой производится следующим образом. Сначала включается низковакуумный насос NL , который откачивает всю систему до давления запуска высоковакуумного насоса, после чего включается высоковакуумный насос ND . На первой стадии откачки осуществляется удаление основного количества газа с помощью низковакуумного насоса. На второй – посредством высоковакуумного насоса удаляется не только оставшийся газ, но и газ, сорбированный деталями установки. На первой стадии поток газовыделения по сравнению с потоком газа, откачиваемого из объема, является ничтожно малым.

В каждую из ступеней откачки вакуумной системы помимо соответствующего насоса входит трубопровод, соединяющий насос с откачиваемым объемом или с насосом более высоковакуумной ступени. Трубопровод, как и любой элемент вакуумной системы, характеризуется пропускной способностью или *проводимостью* U , зависящей от его геометрических размеров и являющейся коэффициентом пропорциональности между потоком и разностью давлений на концах элемента:

$$U = \frac{Q}{p_{\text{ВХ}} - p_{\text{ВЫХ}}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1.7)$$

где Q – поток газа вдоль трубопровода; $p_{\text{ВХ}}$ – давление на входе трубопровода; $p_{\text{ВЫХ}}$ – давление на выходе трубопровода.

Для трубопровода пропускную способность в достаточно широком диапазоне давлений можно определять по следующей формуле (уравнение Кнудсена): $U = U_{\text{В}} + U_{\text{М}} \cdot K$, где $U_{\text{В}}$ и $U_{\text{М}}$ – проводимости в вязкостном и молекулярном режимах течения газа соответственно; K – коэффициент, зависящий от среднего давления в трубопроводе. Соответствующие выражения проводимостей для круглого трубопровода длиной L и диаметра d в азотном эквиваленте равны:

$$U_{\text{В}} = 1,36 \cdot 10^3 \cdot \frac{d^4}{L} \cdot p_{\text{ср}}; \quad U_{\text{М}} = 121 \cdot \frac{d^3}{L}; \quad (1.8)$$

$$K = \left(\frac{1 + 1,9 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{\text{ср}}}{1 + 2,35 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{\text{ср}}} \right);$$

здесь $p_{\text{ср}} = (p_{\text{ВХ}} + p_{\text{ВЫХ}})/2$.

Если в трубопровод включены какие-либо другие элементы вакуумной арматуры – клапаны, ловушки, то суммарная пропускная способность определяется по формуле:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \dots, \quad (1.9)$$

где U_1 , U_2 , и т.д. – пропускные способности отдельных последовательных элементов вакуумного тракта.

В условиях непрерывного газового потока из камеры в насос будет выполняться равенство

$$Q = S_H \cdot p_H = S_{\text{эф}} \cdot p, \quad (1.10)$$

где S_H и p_H – быстрота действия насоса и давление на входе в насос; p – давление в откачиваемой камере; $S_{\text{эф}}$ – *эффективная быстрота откачки насоса*, равная объему газа, выходящему в единицу времени из вакуумной камеры при фиксированном давлении. Наличие соединительных трубопроводов приводит к тому, что между вакуумным насосом и откачиваемым объемом вакуумной камеры возникает перепад давлений: $p - p_H = Q/U$. Таким образом, **откачка вакуумной камеры будет осуществляться с некоторой $S_{\text{эф}}$** , заведомо меньшей быстроты действия насоса S_H с учетом ограничивающего действия проводимости U соединительного трубопровода:

$$\frac{1}{S_{\text{эф}}} = \frac{1}{U} + \frac{1}{S_H}. \quad (1.11)$$

Соотношение между собственной быстротой действия насоса S_H и эффективной быстротой откачки определяет коэффициент использования насоса. Значительное снижение $S_{\text{эф}}$ по сравнению с S_H свидетельствует о низкой эффективности использования насоса, т.е. об ошибке в проектировании вакуумной системы в целом. Допустимыми можно принять отношения $S_H/S_{\text{эф}}$, равные 1,5–2. Уравнение (1.11) часто называют «основным уравнением вакуумной техники».

В результате зависимость полного давления от времени в откачиваемом объеме вакуумной системы V будет описываться дифференциальным уравнением

$$V \cdot \frac{dp}{dt} = Q_{\text{ГВ}} + Q_{\text{Т}} - p \cdot S_{\text{эф}}. \quad (1.12)$$

Поток, обусловленный натеканием, находится из выражения

$$Q_T = \sigma \cdot (p_{\text{АТМ}} - p). \quad (1.13)$$

Здесь σ – коэффициент, определяющий суммарную пропускную способность всех течей (проводимость). Из формулы (1.13) видно, что при давлении в камере $p \ll p_{\text{АТМ}}$ поток натекания не зависит от величины p и будет постоянен во времени.

При малых давлениях ($p < 1$ Па) необходимо учитывать составляющую газовой нагрузки, обусловленную потоком газовой выделения материалов. Поток газовой выделения с внутренних поверхностей вакуумной камеры определяется уровнем начального удельного газовой выделения q_0 , отнесенного к единице поверхности материала камеры, и общей площадью внутренних поверхностей A :

$$Q_{\text{ГВ}} = A \cdot q_0 \cdot k \cdot e^{-kt}, \quad (1.14)$$

где

$$k = k_0 \cdot \exp \left\{ a \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right) \right\}. \quad (1.15)$$

В приведенных выражениях k_0 – коэффициент, характеризующий скорость газовой выделения при нормальной температуре; T – температура откачиваемого объема; t – время; a – коэффициент, зависящий от ряда факторов: материала, степени обработки поверхности вакуумного объема, рода газа и др. Этот коэффициент находится экспериментально. Уровень начального газовой выделения q_0 зависит от материала вакуумной камеры и степени предварительной обработки (очистки) поверхности, его величина во многом определяет и процесс откачки вакуумной системы и уровень достигаемого вакуума.

Из формулы (1.15) видно, что коэффициент k растет с повышением температуры вакуумной системы. Это приводит к увеличению потока газовой выделения в k/k_0 раз и одновременно к более быстрому его затуханию во времени ($\sim e^{-tk}$). Поэтому при получении достаточно высокого вакуума, когда газовой выделение может существенно затормозить процесс откачки, используется прогрев вакуумной системы.

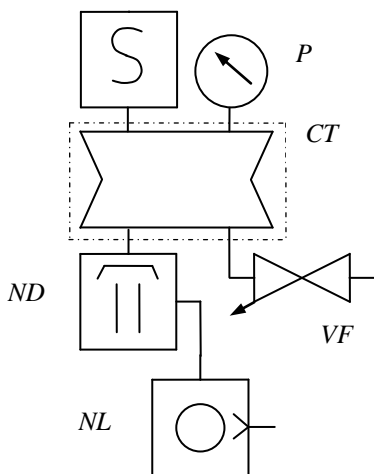
ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Вакуумная система, работа которой моделируется в данной лабораторной работе, является двухступенчатой, включающей низковакуумный (форвакуумный) механический вращательный и высоковакуумный диффузионный насосы (рис. 1.5).

От габаритов и материала вакуумной камеры *CV* (медь, дюралюминий, мягкая и нержавеющей сталь) зависят величина начальных потоков газовыделения и динамика их снижения при откачке камеры, определяющие время выхода вакуумной системы на установившийся режим.

Система нагрева камеры позволяет проводить вакуумную температурную тренировку в диапазоне температур от 293 до 673 К.

Предусмотрена имитация течи в системе заданием величины пропускной способности. Например, по аналогии, клапан *VF* типа НРП-1,6 с ручной регулировкой потока натекания позволяет практически линейно изменять величину потока в диапазоне от 10^{-8} до 10^{-3} Вт.



Р и с. 1.5. Схема моделируемой вакуумной системы:

CT – вакуумная камера
прогреваемая;

S – масс-спектрометр;

P – вакуумметр полного
давления;

VF – натекатель;

ND – диффузионный насос;

NL – механический
вращательный насос

Выбор пары насосов *ND* и *NL* определяет не только время достижения требуемого рабочего давления, но и величину предельного остаточного давления. Соединение насосов между собой и с вакуумной камерой осуществляется трубопроводами соответ-

вующих диаметров и длин, определяемых в ходе моделирования системы.

Предварительная откачка системы осуществляется механическим вращательным насосом NL через отключенный диффузионный насос. Предельное давление зависит от выбора насоса и составляет величины порядка 10^{-2} – 10 Па.

Включение-отключение диффузионного насоса ND в данной работе подразумевает включение-отключение питания нагревателя без учета инерционности данного процесса. Регулировка мощности подогревателя позволяет изменять параметры откачки (характеристики паровой струи) диффузионного насоса. Получаемое предельное давление может находиться для современных насосов в диапазоне 10^{-8} – 10^{-4} Па.

Система контроля вакуумной среды в камере, предполагающая манометры а также масс-спектрометр, обеспечивает анализ динамики процессов изменения как полных, так и парциальных давлений в вакуумной системе.

Главное окно интерфейса программы (рис. 1.6) содержит текстовые поля с параметрами, кнопки «Откачка», «Результаты» «Схема», «Дополнительные параметры», «Восстановить стандартные параметры» и окно расчетного графика $p_{\Sigma}(t)$.

Работа с программой осуществляется следующим образом.

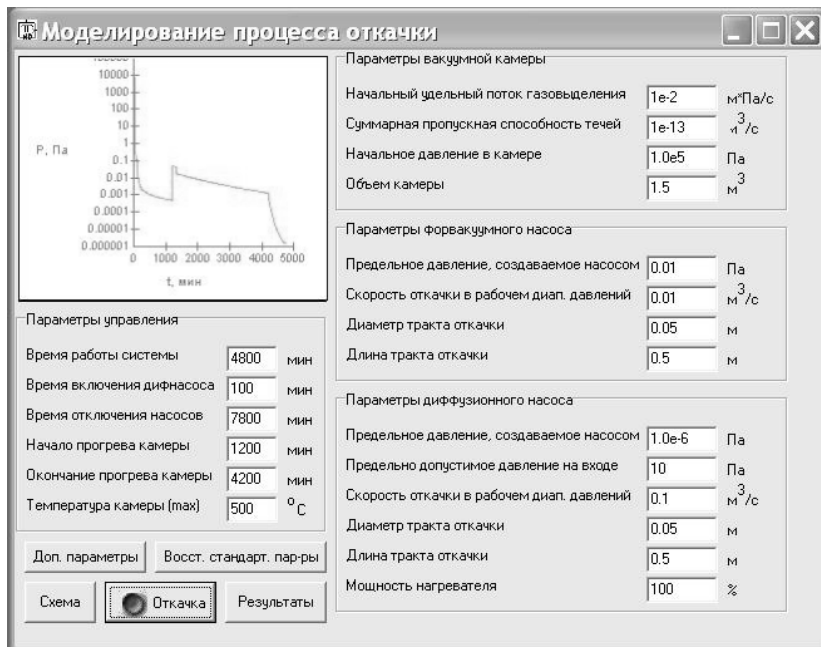
Посредством текстовых полей в программу вводятся параметры вакуумной системы, после чего оператор нажимает на кнопку «Откачка». Через небольшой промежуток времени в окне графика появляется рассчитанная кривая $p_{\Sigma}(t)$.

После окончания счета можно нажимать на кнопку «Результаты», которая открывает на экране окно вывода с увеличенными графиками зависимости суммарного (полного) давления в системе от времени $p_{\Sigma}(t)$, набором зависимостей парциальных давлений от времени $p_i(t)$ и таблицей $p_i(t)$.

Кнопка «Схема» открывает структурную схему моделируемой вакуумной системы.

В окне «Дополнительные параметры» устанавливаются данные по составу откачиваемого газа и параметрам отдельных компонентов, создающих газовую нагрузку вакуумной системы. В обычном режиме работы эти параметры заданы «по умолчанию» и кнопка

«Восстановить стандартные параметры» возвращает их в это исходное состояние.



Р и с. 1.6. Интерфейс программы моделирования вакуумной системы

Ниже описаны параметры, изменяемые в главном окне:

Параметры вакуумной камеры:

- начальный поток газовыделения (рассчитывается исходя из характеристик выбранного материала и площади внутренней поверхности камеры; учет газовыделения начинается с момента включения диффузионного насоса);
- суммарная пропускная способность щелей (течь);
- начальное давление в камере (как правило – атмосферное);
- объем камеры (форма камеры – цилиндрическая).

Параметры форвакуумного насоса:

- предельное (наименьшее достижимое) давление насоса;
- быстрота (скорость) откачки в рабочем диапазоне давлений;
- диаметр и длина тракта откачки.

Параметры диффузионного насоса:

- предельное (наименьшее достижимое) давление насоса;
- предельное (наибольшее допустимое) давление на входе насоса (если в какой-то момент времени давление на входе диффузионного превосходит эту величину, насосы отключаются);
- быстрота (скорость) откачки в рабочем диапазоне давлений;
- диаметр и длина тракта откачки;
- мощность нагревателя, определяющая параметры откачки насоса.

Параметры управления:

- время работы системы (с момента старта, когда включается форвакуумный насос);
- время включения диффузионного насоса (находится по времени достижения давления запуска);
- время включения-отключения прогрева камеры;
- температура (максимальная) камеры при прогреве;
- время отключения насосов.

ЗАДАНИЯ

Выполнение лабораторной работы начинается с получения у преподавателя основных данных по моделируемой вакуумной системе (объем камеры, материал, натекание, величина рабочего давления). По этим параметрам определяются исходные значения моделируемой системы и вводятся в программу.

Затем, исходя из заданных требований к вакуумной камере, подбираются основные средства откачки. Параметры выбранных насосов вводятся в текстовые поля окна программы, задаются ориентировочные размеры соединительных трубопроводов. Диаметры трубопроводов подбираются соответственно диаметрам присоединительных фланцев насосов.

Задание 1

Установить параметры вакуумной камеры, записав в соответствующие текстовые поля окна программы:

- заданный объем вакуумной камеры;

- начальное давление в камере (равное атмосферному, если специально не указано);
- пропускную способность течей (в начале работы можно установить $1 \cdot 10^{-6}$);
- начальный поток газовыделения (в этом поле задается начальный уровень потока со всей внутренней поверхности вакуумной камеры).

Таблица 1.1

Скорость удельного газовыделения с поверхности вакуумных конструкционных материалов при 20°C

Материал	Предварительная обработка материала	Удельный поток газовыделения, Па·м ³ /(м ³ ·с)	Длительность предварительной откачки, ч
Низкоуглеродистая сталь	–	$4,12 \cdot 10^{-4}$ $7,35 \cdot 10^{-5}$ $4,12 \cdot 10^{-5}$	1 6 10
	Отжиг в вакууме при $T = 693 \text{ K}$	$4 \cdot 10^{-10}$	Любая
Коррозионно стойкая сталь	–	$2,4 \cdot 10^{-4}$ $4,12 \cdot 10^{-5}$ $2,54 \cdot 10^{-5}$	1 6 10
	Отжиг в вакууме при $T = 673 \text{ K}$	$4 \cdot 10^{-10}$	Любая
Медь	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	$1,13 \cdot 10^{-5}$ $8,35 \cdot 10^{-7}$	1 5
		$6,12 \cdot 10^{-5}$ $1,03 \cdot 10^{-5}$	1 5
	Отжиг в вакууме при $T = 693 \text{ K}$	$1,06 \cdot 10^{-10}$	Любая
Дюралюминий	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	$4,73 \cdot 10^{-5}$ $3,9 \cdot 10^{-6}$	1 5
		$2,8 \cdot 10^{-4}$ $1,4 \cdot 10^{-4}$	1 5
	–	$5,57 \cdot 10^{-4}$ $1,9 \cdot 10^{-4}$	1 5

Для вычисления начального потока газовыделения сначала рассчитывается площадь внутренней поверхности вакуумной камеры А (диаметр и высоту цилиндрической камеры можно принять равными). Для заданного материала стенок камеры по табл. 1.1 нахо-

дится значение удельного потока с единицы поверхности q_0 . Тогда искомая величина равна $Q_{ГВ0} = q_0 \cdot A \cdot F$. Коэффициент шероховатости поверхности F учитывает превышение истинной площади поверхности над геометрической. Для грубо обработанных поверхностей металлов он может составлять 20 и более, для полированных – 3–5.

Задание 2

Произвести первый этап моделирования низковакуумной откачки с помощью форвакуумного насоса. Полученное давление должно обеспечивать нормальный запуск диффузионного насоса (не более $p_{РАБ} = 10$ Па). Максимальное время откачки до рабочего давления $t_{МАКС} = 20$ –30 мин. Известно, что в камере есть течь. Поток газовой выделения на данном этапе откачки пренебрегаем.

Последовательность выполнения задания

Выбрать насос (табл. 1.2), соответствующие параметры задать в полях для форвакуумной откачки. Время работы системы установить равным 50 мин. Выполнить моделирование откачки.

Таблица 1.2

Характеристик вакуумных пластинчато-роторных насосов
типа НВР, 2НВР

Марка агрегата	Быстрота действия, л/с	Остаточное давление, мм рт.ст.	Диаметр впускного патрубка, мм	Габариты, мм	Масса, кг
НВР-1	1	10	8	290·170·143	8
НВР-1,25Д	1,25	0,008	16	340·135·210	10
2НВР-5ДМ	5,5	0,005	25	555·170·280	26
НВР-16Д	18	То же	63	800·265·415	78
2НВР-90Д	25	То же	То же	800·300·400	100
НВР-250Д	63	То же	То же	1060·370·530	210

Проанализировать полученную зависимость. Определить, чем ограничивается величина достигнутого давления.

Дать рекомендацию: необходимо уменьшать течь или нет? Оценить величину допустимой течи.

Определить размеры трубопровода (допустимые), которые снижают эффективную быстроту откачки насоса приблизительно в 1,5 раза (при $p = p_{\text{РАБ}}$). Выбрать оптимальные размеры трубопровода, соответствующие разумным конструктивным соображениям.

По найденным параметрам рассчитать $t_{\text{ДЕЙСТВ}}$ – действительное время откачки. Это время должно быть меньше, чем $t_{\text{МАКС}}$. Если окажется, что $t_{\text{ДЕЙСТВ}} > t_{\text{МАКС}}$ приступить к выбору параметров насоса и трубопровода для следующего варианта комбинации насосов.

Задание 3

Произвести моделирование высоковакуумной откачки с помощью диффузионного насоса. Параметры откачки: $p_{\text{НАЧ}} = 10$ Па, $p_{\text{РАБ}} = 10^{-3}$ Па, максимальное время откачки $t_{\text{МАКС}} = 2\text{--}3$ ч. Известно, что в камере происходит газовыделение со стенок и есть течь.

Последовательность выполнения задания

Выбрать высоковакуумный насос (табл. 1.3), соответствующие параметры задать в полях для высоковакуумной откачки. Время работы системы установить равным 200 мин. Выполнить моделирование откачки.

Проанализировать полученную зависимость: достаточна ли скорость снижения давления, достигнут ли требуемый уровень вакуума.

Исходя из величины течи и требуемого рабочего давления, дать рекомендации о последующих действиях с целью откачки вакуумной системы:

- а) оставить выбранные предварительно быстроту действия насоса, размер трубопровода и течь;
- б) изменить быстроту действия насоса, сохранив течь;
- в) принять меры к уменьшению течи для того, чтобы достичь рабочее давление при выбранной предварительно скорости действия насоса.

Окончательно определить размер трубопровода так, чтобы эффективная быстрота откачки насоса (при $p = p_{\text{РАБ}}$) снижалась не более, чем в 2 раза.

Если не удастся достичь рабочего давления, то необходимо увеличить быстроту действия насоса.

Рассчитать и проверить согласование насосов по потоку откачиваемого газа и максимальной величине допустимого выпускного давления диффузионного насоса.

Таблица 1.3

Характеристики вакуумных диффузионных
паромасляных агрегатов АВДМ

Технические характеристики	АВДМ-100	АВДМ-160	АВДМ-250	АВДМ-400
Быстрота действия, л/с, в диапазоне рабочих давлений от $6,6 \times 10^{-4}$ до $1,3 \times 10^{-1}$ Па (5×10^{-6} - 1×10^{-3} мм рт. ст.)	130	310	870	2280
Предельное остаточное давление при температуре окружающей среды: от 10 до 25 °С, Па от 25 до 45 °С, Па	$6,6 \cdot 10^{-5}$ $6,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$ $6,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$ $6,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$ $6,6 \cdot 10^{-4}$
Наибольшее выпускное давление, Па (мм рт. ст.), не менее	35 (0,263)	33,3 (0,25)	33,3 (0,25)	33,3 (0,25)
Обратный поток паров рабочей жидкости, мг/мин, см ² , не более	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Диаметр впускного патрубка, мм	100	160	250	400
Диаметр выпускного патрубка, мм	25	40	63	63

Задание 4

Вакуумная система с найденными параметрами откачивается диффузионным насосом. Известно, что в системе есть течь и газовыделение. Необходимо получить предельное разрежение порядка 10^{-5} Па после обезгаживания камеры прогревом. Максимальное допустимое давление в системе в режиме прогрева $p_{\text{ДОП}} = 10^{-1}$ Па. Определить также допустимую течь при заданном предельном разрежении.

Последовательность выполнения задания

Предварительно откачать систему в течение 1 ч и зарегистрировать давление в ней.

Включить прогрев камеры и продолжать откачку. Первоначальный режим: $T = 373$ К, время откачки в режиме прогрева 40–60 мин с последующим отключением прогрева при продолжающейся откачке. Необходимо следить за тем, чтобы давление в системе не превысило максимально допустимое.

Постепенно увеличивая температуру и время прогрева, добиться требуемого уровня обезгаживания камеры для достижения предельного уровня вакуума при остывании камеры.

Оценить, во сколько раз следует уменьшить течь для достижения заданного давления. Выполнить откачку с уменьшенной течью до получения требуемого разрежения.

Исследовать динамику уменьшения парциальных давлений.

Изучить влияние изменения мощности подогревателя насоса на состав вакуумной среды и предельное остаточное давление.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен содержать:

- 1) функциональную схему моделируемой вакуумной системы в принятых условных графических изображениях;
- 2) формулы расчета параметров откачки вакуумной системы;
- 3) таблицу заданных параметров (режимов) моделируемой вакуумной системы;
- 4) таблицу выбранных параметров вакуумной системы для обеспечения заданных величин рабочего давления и времени откачки (в таблице следует привести величины скорости действия насосов, размеры трубопроводов, требуемую длительность и температуру прогрева, максимально допустимый поток натекания при различных условиях);
- 5) полученные графики откачки по всем этапам моделирования процесса откачки;
- 6) процентное содержание отдельных газов в вакуумной системе, полученное на разных этапах откачки;

7) расчетные данные:

- проводимость соединительных трубопроводов;
- предельные давления, получаемые при различных режимах откачки, включая режим вакуумной температурной тренировки;
- режим согласования насосов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. Что называется откачкой вакуумной системы?
2. Чем определяется величина предельного остаточного давления, получаемого в вакуумной системе?
3. Как объяснить изменение спектра масс остаточного газа в процессе откачки вакуумной системы?
4. Чем отличаются процессы в вакуумной системе, связанные с натеканием, от процессов, вызванных газовыделением?
5. В чем смысл вакуумной температурной тренировки?
6. Что называется постоянной времени откачки?
7. Чем определяется минимальное количество ступеней откачки в высоковакуумных системах?
8. В чем смысл согласования насосов?
9. Какая система откачки моделируется в работе?
10. От чего зависит эффективная быстрота откачки насоса?
11. Перечислите основные этапы моделирования вакуумной системы.
12. Какие процессы в вакуумной системе учитываются на разных этапах ее моделирования?

РАБОТА 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВАКУУМНОГО НАСОСА

Цель – изучение устройства и принципа работы высоковакуумного диффузионного паромасляного насоса; приобретение практических навыков работы с вакуумной системой; освоение способов измерения полного давления; исследование рабочих характеристик диффузионного насоса; освоение методики измерения газового потока, откачиваемого насосом.

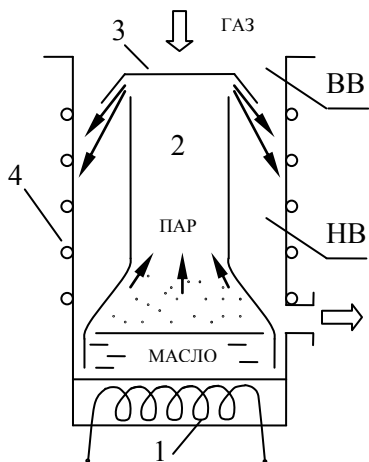
ВВЕДЕНИЕ

Принцип работы высоковакуумного насоса

Откачка вакуумных систем осуществляется с помощью специальных устройств для удаления или поглощения газа – *вакуумных насосов*. Для получения высокого вакуума применяются системы откачки в несколько ступеней, содержащих низко- и высоковакуумные насосы. **Высоковакуумные насосы** работают в условиях *молекулярного течения* газа, когда средняя длина свободного пути молекул превосходит поперечный размер элементов вакуумной системы и, соответственно, главным образом молекулы соударяются с внутренними поверхностями, а не друг с другом. Поэтому процесс высоковакуумной откачки представляет собой захват и удержание (удаление) отдельно взятых молекул, взаимодействующих с рабочими поверхностями насосов, которые являются главными элементами их конструкций.

В данной работе в качестве верхней ступени откачки используется *диффузионный вакуумный насос*, представляющий собой **пароструйный высоковакуумный насос**, в котором за счет диффузии происходит захват молекул откачиваемого газа в паровую струю рабочего вещества. Таким образом, в этом насосе основным рабочим телом, обеспечивающим захват молекул газа, является высокоскоростная струя пара. Работа диффузионных насосов основана на принципе **передачи импульса молекулам откачиваемого газа** при их соударениях с более тяжёлыми молекулами струи пара,

куда они попадают за счёт самодиффузии при столкновениях с поверхностью струи. В качестве рабочих жидкостей в насосах обычно используют натуральные и синтетические вакуумные масла.



Р и с. 2.1. Схема диффузионного вакуумного насоса:
ВВ – область высокого вакуума;
НВ – область низкого вакуума

Простейший диффузионный вакуумный насос (рис. 2.1) состоит из нагревателя для разогрева рабочей жидкости 1, паропровода 2, тарельчатого сопла 3, позволяющего развернуть струи пара в направлении откачки, холодильника для охлаждения стенок корпуса насоса 4, впускного и выпускного патрубков. Пары масла из испарителя по паропроводу входят в сопло Лавали. Здесь они ускоряются, расширяются и образуют **паровые струи, разделяющие рабочий объем насоса на область высокого вакуума и область низкого вакуума**. Паровая струя в таком насосе представляет собой кольцевой усеченный конус, образованный постоянным потоком рабочего вещества. Молекулы газа из откачиваемого объема диффундируют в паровую струю и либо увлекаются ею, либо проходят сквозь нее.

Попадая на охлажденные стенки насоса, пар конденсируется, и масло стекает обратно в испаритель. Газ, увлеченный струей пара, выделяется при конденсации парогазовой смеси. Откачиваемые газы собираются в области низкого вакуума под паровой струей и удаляются вспомогательным насосом через выходной фланец.

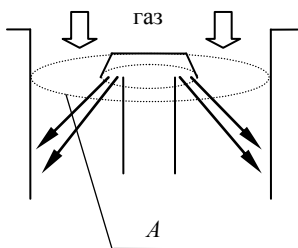
Быстродействие вакуумного насоса

Теоретически максимальная *быстрота действия* вакуумного насоса определяется объемом газа, проходящего в единицу времени через входное сечение насоса при определенных давлении и температуре, т.е. зависит от геометрических размеров входного патрубка насоса и парциального давления (концентрации) откачиваемого газа:

$$S_{T_{\text{макс}}} = \frac{dV}{dt} = \frac{d\left(\frac{N}{n}\right)}{dt} = \frac{A}{n} \cdot v, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.1)$$

где n – концентрация молекул газа у входа в насос, м^{-3} ; N – число молекул газа, проходящих через входное сечение насоса. Отношение dN/dt есть число молекул, прошедших через сечение насоса в единицу времени (*поток молекул*) и может быть выражено как частота (число) столкновений молекул с поверхностью единичной площади v , с^{-1} , умноженная на площадь поперечного сечения во входном отверстии насоса A , м^2 .

В конструкции диффузионного насоса со стороны входного патрубка молекулярный поток откачиваемого газа проходит через сечение, образуемое цилиндрическим корпусом насоса и тарельчатым соплом (рис. 2.2). При этом проходное сечение A является проекцией поверхности паровой струи, на которую «падают» молекулы откачиваемого газа.



Р и с. 2.2. Схема сопла диффузионного насоса:
 A – проходное сечение

Проникающий в паровую струю газ создает определенную концентрацию растворенного в струе газа n_r . Растворенный газ не только увлекается паровой струей в сторону откачки, но и диффундирует по струе, в том числе и в обратном направлении ко входному отверстию насоса. Это явление приводит к снижению

максимальной теоретической быстроты действия насоса $S_{\text{Тмакс}}$ до значения

$$S_{\text{T}} = \frac{A}{n} \cdot (v_1 - v_2), \quad (2.2)$$

где v_1 и v_2 – количество молекул откачиваемого газа, ударяющихся и вылетающих в единицу времени с единицы площади сечения A . При подстановке соответствующих выражений для v и средней арифметической скорости молекул v_{AP} формулу (2.2) можно записать в виде

$$S_{\text{T}} = \frac{A}{4n} \cdot \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \cdot (n\sqrt{T} - n_{\text{T}}\sqrt{T_{\text{T}}}), \quad (2.3)$$

где n и n_{T} – концентрации газа откачиваемого и в паровой струе; T и T_{T} – температура газа у входа в насос и в паровой струе соответственно; m – масса молекул газа. Из этого выражения следует, что **быстрота действия диффузионного насоса зависит от температуры и рода газа**, при этом тяжёлые молекулы откачиваются с меньшей быстротой действия:

$$\frac{S_1}{S_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}. \quad (2.4)$$

Реальная быстрота действия насоса S_{H} оказывается еще меньше теоретического значения, что связано с эффективностью захвата струей молекул откачиваемого газа: $S_{\text{H}} = S_{\text{T}} \cdot H$, где H – коэффициент захвата молекул газа в струю, составляющий величины в диапазоне 0,3–0,5. Наилучшие условия проникновения молекул в паровую струю наблюдаются в случае примерного равенства давления пара в струе среднему давлению откачиваемого газа. **С ростом плотности паровой струи вероятность захвата молекул газа в струю пара снижается.** При нормальных же условиях работы диффузионного насоса давление пара в струе оказывается намного выше давления газа над струей.

Рабочие характеристики насоса

Минимальное давление, обеспечиваемое насосом без откачиваемого объема, называется *предельным давлением насоса*. Иными словами, предельное давление насоса p_0 – самое низкое давление,

которое может обеспечить насос при работе «на себя», т.е. при работе с закрытым входным патрубком. **Величина p_0 определяется равновесием откачиваемого и обратного потоков газа.**

Обратный поток из насоса создается несколькими источниками:

- противодиффузией газа через паровую струю;
- давлением насыщенных паров рабочей жидкости;
- выносом со струей пара газов, растворенных в ней;
- газовой выделением стенок насоса.

Противодиффузия газа через паровую струю, возникающая из-за перепада давлений над и под струей, зависит от плотности $\rho_{\text{п}}$ и скорости $v_{\text{п}}$ паровой струи, а также молекулярной массы откачиваемого газа. Коэффициент противодиффузии газа через паровую струю обратно пропорционален плотности и скорости паровой струи, а также значительно больше для легких газов, чем для тяжелых. Следовательно, противодиффузия тем меньше, чем меньше перепад давлений и чем больше $\rho_{\text{п}}$, $v_{\text{п}}$ и молекулярная масса откачиваемого газа.

Давление насыщенного пара рабочей жидкости насоса обычно на несколько порядков ниже реально достигаемого p_0 . Однако вакуумные масла, используемые в качестве рабочей жидкости, при работе насоса могут подвергаться разделению на фракции с различной упругостью пара. Поэтому при оценке влияния на предельное давление насоса следует рассматривать не упругость пара масла, заливаемого в насос, а упругость фракций масла.

Вынос газа со струей из испарителя возникает из-за того, что при конденсации паровой струи на стенках насоса происходит частичное растворение газа в конденсате. Попавший вместе с конденсатом в кипятильник газ затем увлекается паром к соплу и выделяется из паровой струи в откачиваемый объем.

Величина p_0 зависит и от мощности нагревателя диффузионного насоса W , так как от нее зависят параметры паровой струи, такие как скорость и плотность, определяющие величину противодиффузии.

Соотношение потока откачиваемого газа и обратного потока определяет еще один параметр вакуумного насоса, его *производительность* $Q_{\text{н}}$, Па·м³/с, равная потоку газа, проходящему через входное сечение насоса. Производительность откачки насоса есть

разность откачиваемого прямого $Q_{\text{ПР}}$ и обратного $Q_{\text{ОБР}}$ потоков:

$$Q_{\text{Н}} = Q_{\text{ПР}} - Q_{\text{ОБР}}. \quad (2.5)$$

В процессе откачки при выполнении равенства $Q_{\text{ПР}} = Q_{\text{ОБР}}$ достигается предельное давление насоса и $Q_{\text{Н}}$ обращается в ноль, т.е. насос перестает откачивать. В области рабочих давлений зависимость $Q_{\text{ПР}}(p)$ имеет линейный характер.

При постоянном расходе газа $Q_{\text{Н}}$ и неизменном давлении на входе насоса $p_{\text{Н}}$ возникает установившийся режим откачки. Величина

$$S_{\text{Н}} = Q_{\text{Н}}/p_{\text{Н}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.6)$$

является мерой откачивающей способности данного насоса и называется *быстротой действия вакуумного насоса*. Для большинства насосов этот параметр практически постоянен в рабочем диапазоне давлений. **При достижении p_0 наступает баланс прямого и обратного потоков и быстрота действия насоса стремится к нулю.** Откачиваемый насосом прямой поток можно представить как $Q_{\text{ПР}} = S_0 \cdot p_{\text{Н}}$, где S_0 – номинальная (максимальная) быстрота действия насоса. Из условия равенства потоков при $p_{\text{Н}} = p_0$ следует: $Q_{\text{ПР}} = Q_{\text{ОБР}} = S_0 \cdot p_0$. Тогда соотношение (2.5) можно записать в виде

$$S_{\text{Н}} \cdot p_{\text{Н}} = S_0 \cdot p_{\text{Н}} - S_0 \cdot p_0, \quad (2.7)$$

откуда получаем выражение для $S_{\text{Н}}$ в области малых давлений –

$$S_{\text{Н}} = S_0 \cdot (1 - p_0/p_{\text{Н}}). \quad (2.8)$$

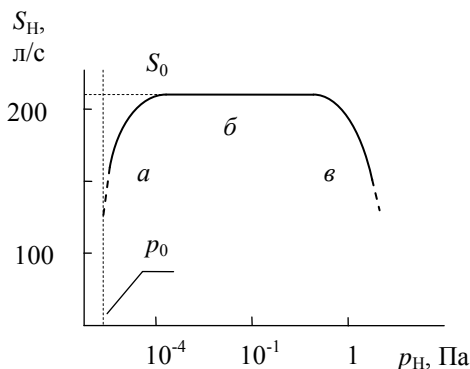
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Зависимость быстроты действия от впускного давления

Основной характеристикой вакуумных насосов является зависимость $S_{\text{Н}}(p_{\text{Н}})$. Пример зависимости $S_{\text{Н}}(p_{\text{Н}})$ для диффузионного насоса представлен на рис. 2.3. Величина $S_{\text{Н}}$ мала в области низких давлений (участок *а*), затем возрастает и в широком диапазоне давлений остается постоянной (участок *б*), при высоких давлениях снова уменьшается (участок *в*).

При низких давлениях (участок *а*) величина $S_{\text{Н}}$ мала из-за того, что поток газа, откачиваемый насосом из объема, сравним с обратным потоком самого насоса. Со снижением впускного давления

уменьшается величина прямого потока откачки, и он сравнивается с обратным потоком, обусловленным противодиффузией.



Р и с 2.3. Зависимость быстроты действия диффузионного насоса от величины выпускного давления насоса

По мере увеличения p_H количество газа, удаляемого насосом из откачиваемого объема, растет и начинает значительно превосходить количество газа, поступающего обратно. Когда их величины становятся несоизмеримыми, S_H перестает зависеть от p_H (участок b). Процесс диффузии газа в струю пара в данном типе насосов практически не зависит от входного давления. Поэтому S_H в средней области рабочих давлений остается постоянной.

При больших p_H , когда происходит увеличение давления за верхнюю границу молекулярного режима течения газа, S_H снижается в связи с уменьшением скорости диффузии молекул газа в струю пара. Дальнейший рост давления над насосом может привести к значительному возрастанию выпускного давления насоса $p_{\text{вып}}$ и нарушению нормального режима работы паровой струи, сопровождающимся падением быстроты действия насоса.

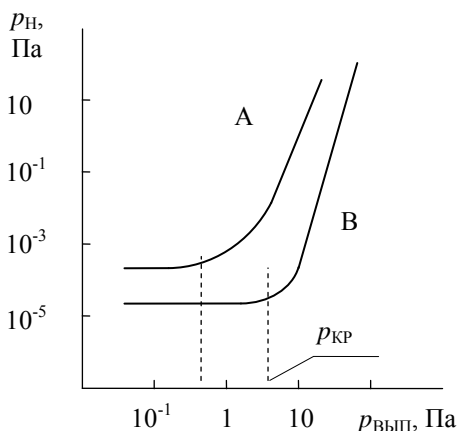
Зависимость быстроты действия от выпускного давления

Ограниченность быстроты действия вспомогательного низковакуумного насоса может привести к значительному возрастанию выпускного давления $p_{\text{вып}}$ с ростом p_H .

При увеличении $p_{\text{вып}}$ до некоторого значения происходит заворачивание струи пара со стенки насоса («срыв струи»), сопровождающееся обратным перетеканием газа из области предваритель-

ного разрежения в область высокого вакуума. Срыв характеристики насоса наступает при равенстве $p_{\text{вып}}$ и давления паровой струи. Величина S_{H} при этом резко уменьшается, а величина впускного давления возрастает.

Наибольшим выпускным давлением $p_{\text{кр}}$ называется максимальное значение давления в выходном сечении вакуумного насоса (на стороне предварительного разрежения), при котором насос может осуществлять откачку. Превышение $p_{\text{кр}}$ приводит к заметному ухудшению характеристик насоса. Зависимость p_{H} от давления на стороне предварительного разрежения приведена на рис. 2.4. Сначала, с ростом $p_{\text{вып}}$, значение p_{H} не претерпевает изменений, а затем, при достижении $p_{\text{кр}}$, оно начинает увеличиваться до тех пор, пока оба этих давления (на входе и на выходе насоса) не сравняются.



Р и с. 2.4. Зависимости впускного давления насоса от величины выпускного давления для разных газов:
А – гелий;
В – воздух

Значение $p_{\text{кр}}$ определяется либо при предельном давлении, если насос предназначен для откачки системы до возможно низкого давления, либо при давлении, соответствующем максимальному потоку нагрузки, если насос предназначен для поддержания требуемого разрежения в системе при удалении большого количества газа.

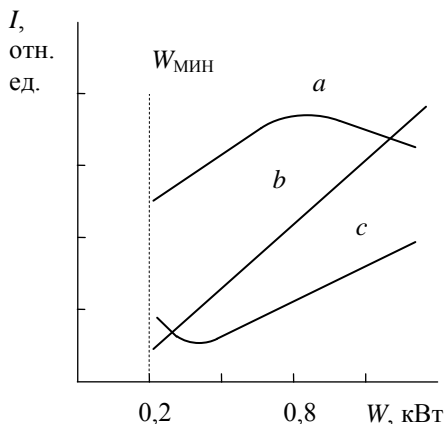
Строго говоря, для высоковакуумных насосов p_{H} на горизонтальном участке зависимости $p_{\text{H}}(p_{\text{вып}})$ должно возрастать с увеличением $p_{\text{вып}}$ вследствие обратной диффузии. Но заметно это ста-

новится только для легких газов, где горизонтальный участок может вообще отсутствовать.

Значение $p_{кр}$ высоковакуумных насосов для большинства современных пароструйных насосов составляет 2–20 Па.

Зависимость параметров насоса от мощности нагревателя

При начальном увеличении мощности нагревателя W от нуля до некоторого порогового значения $W_{мин}$ насос не работает, так как вся подводимая мощность затрачивается на компенсацию тепловых потерь, а не на парообразование. Выше значения $W_{мин}$ часть мощности расходуется на парообразование, насос начинает работать (рис. 2.5).

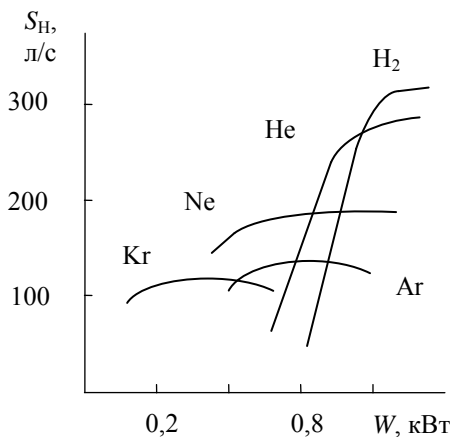


Р и с. 2.5. Зависимость основных параметров диффузионного насоса от мощности нагревателя:
a — быстродействие;
b — выпускное давление;
c — предельное давление

Механизм удаления молекул газа струей пара из откачиваемого объема обусловлен их диффузией и противодиффузией молекул в струю пара, уменьшающихся с ростом плотности струи $\rho_{п}$. При увеличении скорости струи $v_{п}$ прямой диффузионный поток растет, а противодиффузия падает. Поэтому $S_{н}$ уменьшается с возрастанием $\rho_{п}$ и увеличивается с ростом $v_{п}$. С увеличением W выше $W_{мин}$ вначале $v_{п}$ растет быстрее, чем $\rho_{п}$, а затем медленнее. Ввиду этого с увеличением W величина $S_{н}$ сначала возрастает, достигает максимума при некоторой оптимальной мощности подогрева $W_{опт}$ и затем уменьшается (рис. 2.5, *a*).

С увеличением W выше $W_{\text{мин}}$ максимальное выпускное давление насоса непрерывно возрастает в силу роста плотности и давления паровой струи (рис. 2.5, в). Поэтому при увеличении W участок роста p_H на рис. 2.4 будет начинаться при более высоких значениях $p_{\text{кр}}$, или, как говорят, «характеристика сдвигается вправо».

Предельное давление насоса имеет нелинейную зависимость от мощности подогрева (рис. 2.5, с). Сначала с увеличением W растут плотность и скорость паровой струи и уменьшается противодиффузия, повышается температура конденсата и уменьшается растворимость газа в нем. В результате описанных эффектов p_0 в целом понижается. Затем с увеличением степени термического разложения масла возрастает обратный поток легких фракций масла, и p_0 начинает повышаться. Поэтому в зависимости $p_0(W)$ существует минимум при некоторой мощности подогрева.



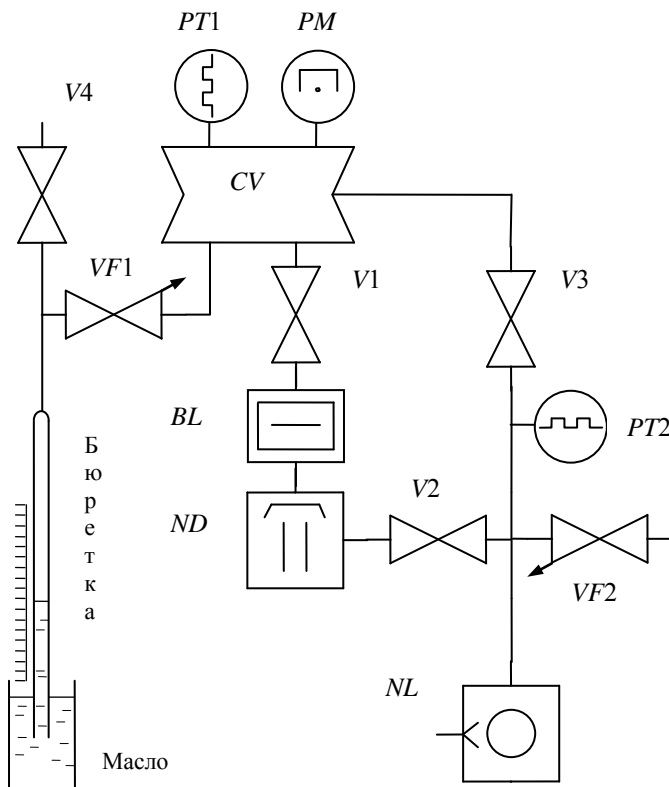
Р и с. 2.6. Быстрота действия насоса по разным газам в зависимости от мощности нагревателя

Зависимость S_H от рода газа в основном определяют коэффициентом диффузии газа и структура струи. На рис. 2.6, где изображены зависимости $S_H(W)$ для различных газов, видно, что значение $W_{\text{опт}}$ для легких газов смещается вправо. Это объясняется тем, что уменьшение диффузии в струю пара для легких газов начинается при больших значениях $p_{\text{п}}$, чем для тяжелых газов. Следовательно, для получения наибольших S_H по газам различной молекулярной массы необходима установка оптимального режима подогрева насоса для каждого газа. Так, например, в гелиевом

масс-спектрометрическом течеискателе $W_{\text{ОПТ}}$ устанавливается такой, чтобы получить достаточно большую $S_{\text{Н}}$ по гелию. Это дает возможность увеличить чувствительность прибора.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис. 2.7.



Р и с. 2.7 Схема лабораторного вакуумного стенда по изучению характеристик высоковакуумного насоса

Диффузионный насос ND подключен к вакуумной камере CV через охлаждаемую ловушку (отражатель) BL и затвор $V1$. Пред-

варительная и вспомогательная откачка системы осуществляются с помощью низковакуумного механического вращательного насоса *NL*. Линия предварительной (байпасной) откачки через клапан *V3* позволяет ускорить получение предварительного разрежения в вакуумной камере. Клапан *V2* переключает насос *NL* в режим вспомогательной откачки высоковакуумного насоса *ND*.

Бюретка используется при измерении быстроты откачки насоса. Натекатель *VF1* предназначен для изменения давления в вакуумной камере *CV* путем регулировки потока поступающего газа. Клапан *V4* позволяет переключать откачиваемый поток либо из атмосферы, либо из бюретки.

Натекатель *VF2* позволяет менять давление на выходе диффузионного насоса.

Давление в системе контролируется с помощью трех вакуумметров. На вакуумной камере *CV* установлены низковакуумный тепловой вакуумметр *PT1* и высоковакуумный магниторазрядный вакуумметр *PM*. Давление на выходе диффузионного насоса контролируется с помощью вакуумметра *PT2*.

ЗАДАНИЯ

Включение установки

Включение установки, а также все последующие операции на лабораторном вакуумном стенде проводятся под наблюдением преподавателя и персонала лаборатории.

Включить питание стенда, открыть водяное охлаждение насоса, установить диапазон измерений тепловых вакуумметров по самой «грубой» шкале, включить питание тепловых вакуумметров.

Задание 1

1.1. Предварительная откачка вакуумной системы

Включить низковакуумный насос *NL* (по указанию преподавателя низковакуумная откачка может выполняться с помощью централизованной форвакуумной системы лаборатории).

Провести откачку низковакуумного тракта, контролируя давление по вакуумметру $PT2$ и постепенно переключая вакуумметр на более чувствительные шкалы, до давления 2–5 Па (15–20 делений на самой чувствительной шкале).

После получения в низковакуумном тракте предельного давления (2–5 Па), выполнить предварительную откачку высоковакуумной части системы. Зафиксировав начальное давление по вакуумметру $PT1$, последовательно открыть клапаны $V2$, $V1$ и снять временную зависимость $p(t)$ низковакуумной откачки камеры CV (по показаниям вакуумметра $PT1$). Вакуумметр $PT2$ предварительно переключить на более «грубую» шкалу, так как изначально произойдет сброс давления из вакуумной камеры. В результате откачки показания обоих тепловых вакуумметров должны практически сравняться.

По полученным данным построить график низковакуумной откачки системы $p(t)$.

1.2. Высоковакуумная откачка

Включить питание диффузионного насоса ND . Прогрев будет длиться 35–40 мин.

Снять зависимость давления в вакуумной камере CV от времени. Измерения проводить сначала по тепловому вакуумметру $PT1$ на самой чувствительной шкале, и при приближении к пределу измерений включить магниторазрядный вакуумметр PM . Продолжить регистрацию давления по вакуумметру PM .

Регистрируя давление в вакуумной камере, найти оптимальную мощность подогрева, добившись получения наименьшей величины предельного вакуума.

По полученным данным построить график высоковакуумной откачки системы $p(t)$.

Задание 2

Экспериментальные характеристики $S(p)$

Эффективная быстрота откачки вакуумной камеры $S_{эф}$ в соответствии с основным уравнением вакуумной техники (1.11):

$$S_{\text{ЭФ}} = S_{\text{Н}} \cdot U / (S_{\text{Н}} + U), \quad (2.6)$$

где U – проводимость вакуумной арматуры между камерой и насосом. При наличии поступающего в вакуумную камеру постоянного газового потока Q выполняется соотношение (1.10) – $Q = S_{\text{ЭФ}} \cdot p$, где p – давление в камере. Следовательно, возможно определение быстроты откачки насоса по известному значению газового потока и измеренному давлению в вакуумной камере.

Для измерения данной характеристики необходимо, во-первых, изменить величину давления в системе регулировкой газового потока и, во-вторых, определить быстроту откачки. Давление в вакуумной камере изменяется с помощью соответствующей регулировки потока натекания Q через натекатель VF1 и измеряется вакуумметром РМ.

Возможны два источника потока натекания:

- атмосферный воздух при открытом клапане V4 (этот источник используется при выборе давления p в системе);
- воздух, находящийся в бюретке при атмосферном давлении (при закрытом клапане V4), этот источник используется при определении потока Q **(необходимо помнить, что количество газа ограничено объемом бюретки и, следовательно, лимитировано время его использования)**.

Быстрота откачки $S_{\text{ЭФ}}$ при известном давлении в камере p может быть найдена из уравнения $S_{\text{ЭФ}} = Q/p$. Поток газа Q определяется как отношение количества газа $\Delta(p_{\text{Б}} \cdot V_{\text{Б}})$, откаченного вакуумной системой из бюретки через натекатель за время Δt , где $V_{\text{Б}}$ – объем газа в бюретке, $p_{\text{Б}}$ – давление в бюретке.

При откачке газа из бюретки происходит подъем масла, так как давление в ней уменьшается на величину $\Delta p = h \cdot \rho_{\text{М}} / \rho_{\text{Р}}$, где h – высота подъема масла; $\rho_{\text{М}}$ – плотность масла; $\rho_{\text{Р}}$ – плотность ртути (здесь считается, что высота столбика масла h является мерой давления – 15 мм масляного ст. = 1 мм рт. ст.). Одновременно уменьшается объем газа в бюретке на величину $\Delta V = h \pi d^2 / 4$, где d – внутренний диаметр бюретки. Таким образом, откаченное за время Δt количество газа в случае подъема масла на высоту h составляет

$$\Delta(p_{\text{Б}} \cdot V_{\text{Б}}) = V_{\text{Б}} \cdot \Delta p + p_{\text{АТМ}} \cdot \Delta V = h \cdot (V_{\text{Б}} \cdot \rho_{\text{М}} / \rho_{\text{Р}} + p_{\text{АТМ}} \cdot \pi d^2 / 4). \quad (2.7)$$

Выражение в скобках представляет собой постоянную величину, называемую «постоянной бюретки» K_B . В данной работе величина равна $K_B = 1,33 \text{ л} \cdot \text{Па} / \text{мм}$. В этом случае быстрота откачки равна

$$S_{\text{ЭФ}} = K_B \cdot h / (p \cdot \Delta t). \quad (2.8)$$

Проведение измерений

Включить подсветку шкалы бюретки, **клапан V4 открыт**.

Плавно, придерживая за корпус, открывать натекатель VF1 (микрометрический винт) и установить давление в вакуумной камере системы в районе 90 делений по шкале магниторазрядного вакуумметра.

Закрывать клапан V4, после чего зафиксировать время подъема масла в бюретке на высоту 100 мм. Открыть клапан V4 и опустить масло на исходный уровень. Повторить измерения несколько раз для получения наиболее достоверного среднего значения.

Проделать предыдущие два действия для значений давления в камере, соответствующих 85, 80 и 75 делениям по шкале магниторазрядного вакуумметра. Записать в таблицу данные зависимости времени подъема масла в бюретке на высоту 100 мм от величины давления. **После проведения измерений не забыть оставить открытым клапан V4.**

Рассчитать значения быстроты откачки по формуле (2.8).

По полученным данным построить зависимость $S(p)$.

Задание 3

Измерение характеристики $p(p_{\text{вып}})$

Закрывать натекатель VF1, получить в вакуумной камере наименьшее предельное давление $p_{\text{пр}}$ (по вакуумметру PM). Записать полученный результат.

Открывая натекатель VF2 на низковакуумном тракте установки, увеличивать $p_{\text{вып}}$, фиксируя значения давления в камере p (по вакуумметру PT1) и на выходе диффузионного насоса $p_{\text{вып}}$ (по вакуумметру PT2). Производить увеличение $p_{\text{вып}}$ до тех пор (ориентировочно 10 Па или 7–8 делений по чувстви-

тельной шкале теплового вакуумметра) пока не начнет увеличиваться давление в камере. **Допускается рост давления в камере не более чем на 50%.**

Зафиксировать найденное значение $p_{\text{кр}}$. Закрыть натекаТЕЛЬ VF2.

По полученным данным построить зависимость $p(p_{\text{вып}})$.

Выключение установки

Выключение установки производится с разрешения и под контролем преподавателя.

Проверить, закрыты ли натекатели VF2, VF1 (клапан V4 должен быть открыт), выключить подсветку шкалы бюретки.

Выключить питание диффузионного насоса ND. Через 30–40 мин после выключения диффузионного насоса закрыть V2.

Выключить насос ND (при откачке через централизованную форвакуумную систему лаборатории выключения насоса не требуется).

Отключить питание стенда, закрыть водяное охлаждение.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен содержать:

- 1) принципиальную схему вакуумной системы лабораторного стенда в условных графических изображениях;
- 2) таблицы экспериментальных данных по каждому заданию;
- 3) графики низковакуумной и высоковакуумной откачки;
- 4) экспериментальную зависимость скорости откачки насоса от давления над насосом;
- 5) график зависимости давления над насосом от выпускного давления;
- 6) найденные значения параметров: $p_{\text{пр}}$, $W_{\text{опт}}$, S_0 , $p_{\text{кр}}$, указанные с расчетными экспериментальными погрешностями.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. На чем основано действие диффузионных вакуумных насосов?
2. Что называется быстротой действия вакуумного насоса?
3. Какие процессы в насосе приводят к снижению теоретической скорости действия?
4. Чем определяется величина предельного давления насоса?
5. Что такое оптимальная мощность подогрева?
6. Чем определяется производительность вакуумного насоса?
7. Какими процессами в насосе объясняется ход зависимости скорости действия от давления?
8. Как зависит скорость действия насоса от рода газа?
9. Что называется наибольшим выпускным давлением насоса?
10. Какие факторы определяют величину наибольшего выпускного давления?
11. Как мощность нагревателя влияет на основные рабочие характеристики диффузионного насоса?
12. В чем заключается применяемый метод определения скорости откачки насоса?

РАБОТА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРЦИАЛЬНОГО СОСТАВА ОСТАТОЧНОГО ГАЗА

Цель – изучение принципов масс-спектрометрических измерений; освоение методики получения и расшифровки спектра масс остаточного газа; получение навыков работы на вакуумной установке с анализатором парциальных давлений; оценка основных характеристик вакуума в установках с электрофизическими средствами откачки.

ВВЕДЕНИЕ

Состав остаточных газов

Измерения полного давления остаточных газов в вакуумных системах оказываются недостаточными для решения задач, поставленных перед вакуумными информационно-измерительными системами. Для подавляющего большинства систем необходимо не только знать состав газовой среды, в которой происходит исследуемый физический процесс, но и контролировать этот состав. Характеризуется состав газовой среды *парциальными давлениями*, т.е. давлениями определенных компонентов газовой смеси.

Состав остаточных газов определяется характеристиками средств откачки, степенью обезгаженности поверхностей вакуумной камеры и введенных в нее конструкций, составом продуктов газовыделения или стационарной газовой нагрузки, герметичностью оболочки и другими факторами. Анализируя состав остаточных газов, можно выделить основную причину отклонения состава газовой среды от требуемого, в том числе нарушение герметичности вакуумной системы.

Для измерения парциальных давлений в вакуумной технике используются *масс-спектрометрические газоанализаторы (масс-спектрометры)*, предназначенные для разделения ионизированных молекул или атомов вещества по их массам.

Газоанализаторами остаточных газов служат небольшие динамические или упрощенные статические масс-спектрометры, не

имеющие собственной откачной системы и состоящие из масс-спектрометрического преобразователя и измерительной системы. Масс-спектрометрический преобразователь устанавливается непосредственно на испытываемой вакуумной системе.

Масс-спектрометрические преобразователи

Основными элементами любого масс-спектрометрического преобразователя являются: ионизатор молекул остаточного газа, сепаратор ионов (анализатор), коллектор ионов и измерительная система. Практически во всех масс-спектрометрических преобразователях молекулы анализируемых газов ионизируются в ионизаторе бомбардировкой ускоренным электронным пучком. Образовавшиеся положительные ионы вытягиваются из ионизатора и направляются в область анализа, где под действием электрических или магнитных полей (часто совмещенных) разделяются в пространстве (или во времени).

Разделение ионов происходит по характерному для них отношению массы иона m к его заряду q . Отношение m/q называется *массовым числом M* и выражается в атомных единицах массы. Здесь заряд иона берется в целых числах элементарного заряда – $q = ne$, а молекулярная масса выражается в атомных единицах массы (1 а.е.м. равняется 1/12 массы атома изотопа углерода ^{12}C). Для однозарядных ионов массовое число совпадает с молекулярной массой иона (в целых числах). Например, для иона H_2^+ – $M = 2$ а.е.м., иона CO_2^+ – $M = 44$ а.е.м. и т.д.

При разделении по массовым числам масс-спектрометр настраивается так, что на коллектор приходят ионы только одного сорта (массы). Во внешней цепи коллектора при этом возникает ток $I_{\text{и}}$, величина которого пропорциональна парциальному давлению данного газа. Изменяя последовательно настройку масс-спектрометра на определенные массовые числа, можно добиться, чтобы на коллектор приходили ионы разных газов, образуя во внешней цепи коллектора последовательный ряд пиков ионного тока, графическое изображение которых называют *масс-спектром* анализируемого газа, пример которого приведен на рис. 3.1, а).

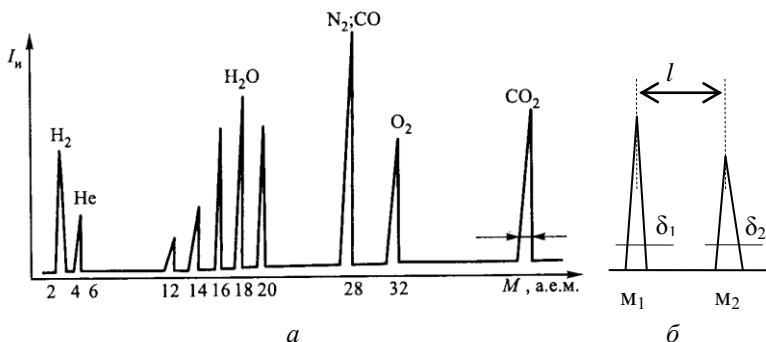
Основными характеристиками масс-спектрометров являются: диапазон анализируемых масс (выраженных в а.е.м.), разре-

шающая способность, чувствительность.

Под *разрешающей способностью* понимается способность масс-спектрометра раздельно регистрировать близкие по массам ионы, которая определяется отношением массового числа M к наименьшему различаемому изменению массового числа ΔM :

$$\rho = M / \Delta M.$$

На этот параметр могут влиять массовое число и относительные высоты пиков ионов масс-спектров. Для каждого типа масс-спектрометра существует аналитическое выражение, связывающее разрешающую способность с геометрическими и электрическими параметрами прибора.



Р и с. 3.1. Масс-спектр остаточных газов в вакуумной системе

Экспериментальную разрешающую способность определяют по участку масс-спектра с близко расположенными массами M_1 и M_2 (рис. 3.1, б). Параметры пиков измеряются на уровне 10 или 50% высоты и расчет проводят по формуле

$$\rho = \frac{M}{\Delta M} = \frac{M_1 + M_2}{M_1 - M_2} \cdot \frac{l}{\delta_1 + \delta_2}, \quad (3.1)$$

где $\Delta M = (M_1 - M_2) \cdot (\delta_1 + \delta_2) / 2l$ – ширина пика, а.е.м.; $M = (M_1 + M_2) / 2$ – средняя масса, а.е.м.; δ_1 и δ_2 – ширина пиков на измеряемом уровне высоты; $(\delta_1 + \delta_2) / 2$ – средняя ширина, мм; l – расстояние между пиками, мм.

Максимальная разрешающая способность определяет значение массового числа, при котором могут быть полностью разделены соседние пики, например, при разрешающей способности прибора 50 могут быть разделены соседние пики масс 50 и 51 или 100 и 102, но массы 100 и 101 уже не могут быть разрешены (пики масс перекрываются).

Разрешающая способность масс-спектрометра определяет собой верхний предел измеряемых массовых чисел; чем больше R , тем большие массовые числа могут быть данным прибором зарегистрированы.

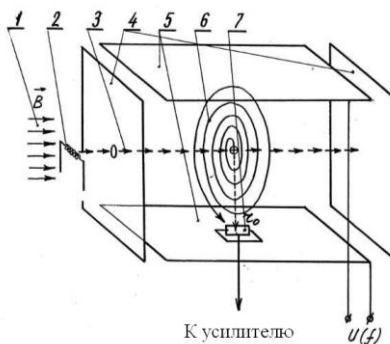
Чувствительность масс-спектрометра определяется как отношение изменения силы ионного тока в цепи коллектора к вызывающему его изменению парциального давления газа и выражается в А/Па. В зависимости от рода газа чувствительность меняется, что важно учитывать для правильной расшифровки масс-спектра. Нижним пределом измеряемых парциальных давлений считается минимальное парциальное давление газа, которое может быть определено при данном отношении «сигнал–шум»; это *порог чувствительности* прибора. Обычно за начало регистрации принимают сигнал, амплитуда которого вдвое превышает уровень фонового сигнала.

С ростом давления происходит падение чувствительности масс-спектрометра вследствие рассеяния ионов в анализаторе, когда средняя длина их свободного пробега λ становится сравнимой с длиной траектории ионов L в анализаторе. Потери ионного пучка при этом могут быть оценены по формуле $I_{\text{КЛ}}/I_{\text{ИОН}} = e^{-L/\lambda}$, где $I_{\text{КЛ}}$ – ток, достигающий коллектора; $I_{\text{ИОН}}$ – ток, вышедший из ионизатора. Давление, при котором отклонение от линейной зависимости между ионным током и соответствующим ему парциальным давлением превышает 10%, принимается за **максимальное рабочее давление**. Обычно масс-спектрометры работают при максимальных давлениях от 10^{-3} до 10^{-2} Па.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Омегатронный масс-спектрометр

Омегатронный масс-спектрометр (омегатрон) – масс-спектрометр ионно-резонансного типа, в котором ионы разделяются при движении по спиральным траекториям в переменном электрическом и ортогональном постоянном магнитном полях. Принцип действия аналогичен принципу действия циклотрона. К объему анализатора приложены взаимно-перпендикулярные постоянное магнитное поле B и переменное электрическое поле $E = E_0 \cdot \sin(\omega t)$ с амплитудой E_0 и частотой $f = \omega/2\pi$. Тонкий электронный луч, параллельный направлению магнитного поля, ионизирует молекулы газа, находящиеся в объеме. Под действием полей B и E ионы совершают вокруг электронного луча вращательное движение в плоскости, перпендикулярной B (рис. 3.2).



Р и с. 3.2. Датчик омегатронного типа:

- 1 – магнитное поле;
- 2 – термокатод;
- 3 – электронный луч;
- 4 – улавливающие пластины;
- 5 – высокочастотные электроды;
- 6 – траектория резонансных ионов;
- 7 – коллектор ионов

Радиус спиральной траектории ионов будет зависеть от времени

$$r = \frac{E_0}{B(\omega - \omega_c)} \sin \frac{(\omega - \omega_c)}{2} t, \quad (3.2)$$

где $\omega_c = qB/m$ – так называемая циклотронная угловая скорость. Из них только ионы с зарядом q и массой m , циклотронная частота вращения которых будет равна частоте приложенного электрического поля, двигаются по раскручивающейся спирали, в результате чего достигают коллектора ионов, расположенного на расстоянии

r_0 от электронного луча (в прорези нижней пластины, рис. 3.2). В этом случае уравнение (3.2) принимает вид $r_0 = E_0 t / 2B$. Эти ионы называются резонансными.

Ионы, массовые числа которых отличаются от резонансных, движутся по круговым траекториям, радиус которых периодически меняется, оставаясь меньше, чем расстояние до коллектора.

При изменении частоты приложенного электрического поля на коллектор ионов попадают частицы с различными отношениями m/q .

Таким образом, величина ионного тока, попадающего на коллектор, является мерой парциального давления частиц газа с определенным массовым числом, находящихся в объеме датчика.

Если магнитное поле постоянно, то произведение $(\omega_c \cdot M)$ – величина постоянная.

Для резонансных ионов выполняется условие $\omega - \omega_c < E_0 / r_0 B$. Здесь выражение $\omega - \omega_c = \Delta\omega$ определяет ширину основания пика по частоте. Разрешающая способность анализатора в этом случае может быть определена как $M/\Delta M = \omega_c / 2(\omega - \omega_c)$:

$$\rho = M/\Delta M = \omega_c B r_0 / 2 E_0 = q B^2 r_0 / 2 E_0 m. \quad (3.3)$$

Таким образом, разрешающая способность датчика уменьшается с увеличением массы иона, т.е. ухудшается для больших масс.

Для датчика омегатрона $r_0 = 8,5 \cdot 10^{-3}$ м, $B = 0,39$ Тл, $E_0 = U_0 / 0,02$ В/м (U_0 – амплитуда высокочастотного напряжения генератора), и разрешение в одну единицу массы достигается вплоть до 40 а.е.м.

Расшифровка масс-спектров остаточных газов

Цель расшифровки спектра масс состоит в определении состава исследуемой газовой смеси с последующим расчетом парциальных давлений каждого газа.

Число пиков в масс-спектрах обычно значительно превышает число компонентов исследуемой газовой смеси. Это связано с тем, что каждый «чистый» газ обладает своим индивидуальным масс-спектром, их аддитивное наложение и определяет общий масс-спектр. Наиболее характерный для данного газа пик – основной, остальные – сопутствующие.

Причины, приводящие к образованию индивидуального масс-спектра: образование ложных пиков, появление осколочных и многозарядных ионов, ионов изотопов и т.п. Вследствие этого отсутствует четкая корреляция между определенными пиками и определенными газами, между их амплитудой и парциальным давлением. Однако, зная относительное содержание основных и сопутствующих пиков, можно определить все компоненты, входящие в газовую смесь.

Таким образом, задача расшифровки масс-спектра состоит из двух частей:

- определение компонентного состава смеси газов;
- расчет парциальных давлений.

Перед проведением количественного анализа приборы предварительно калибруют по каждому компоненту смеси. Пробу i -го газа вводят в объем с масс-спектрометром и регистрируют давление обычным манометром. По главной линии спектра данного компонента определяют чувствительность анализатора, а также находят отношение интенсивностей всех линий спектра данного газа (сопутствующих) к интенсивности главной линии. Результаты калибровки сводят в таблицы, в которых приведены относительные амплитуды сопутствующих пиков в индивидуальных масс-спектрах: $\beta = U_c/U_o$, где U_o – амплитуды основных пиков; U_c – амплитуды сопутствующих пиков (табл. 3.1).

Обычно для высоковакуумных систем приблизительный вид спектра и его компоненты известны. Например, в системах, откачиваемых сорбционными насосами, обычно присутствуют H_2 , He , Ne , N_2 , CO , Ar , для непрогретых систем характерно наличие паров воды.

В этом случае по полученному масс-спектру можно определить качественный состав смеси остаточных газов, сравнивая присутствующие в спектре пики с табл. 3.1. Отсутствие каких-либо пиков в спектре указывает на отсутствие в системе определенных газов (или недостаточную чувствительность масс-спектрометра).

Таблица 3.1

Относительные амплитуды сопутствующих пиков в индивидуальных масс-спектрах газов

m/q, а.е.м.	Ионы	Газ									
		H ₂	He	CH ₄	H ₂ O	Ne	N ₂	CO	O ₂	Ar	CO ₂
1	H ⁺	*		*	0,06						
2	H ₂ ⁺ , He ⁺⁺	1	*	*	0,02						
4	He ⁺		1								
12	C ⁺			0,02				0,03			0,03
13	CH ⁺			0,06							
14	N ₂ ⁺⁺ , CH ₂ ⁺			0,14			0,06				0,03
15	CH ₃ ⁺			0,8							
16	O ⁺ , CH ₄ ⁺			1	0,03			0,04	0,07		0,08
17	OH ⁺ , NH ₃ ⁺			0,07	0,3						
18	HOH ⁺			0,03	1						
20	Ar ⁺⁺ , Ne ⁺					1				0,1	
22	Осколочный					0,1					
28	N ₂ ⁺ , CO ⁺ , C ₂ H ₄ ⁺						1	1			0,13
29	Осколочный						0,01	0,02			
32	O ⁺							0,01	1		
40	Ar ⁺									1	
44	CO ₂ ⁺										1

Примечание: «*» – редко появляющиеся пики; 1 – основной пик газа.

Определение парциальных давлений

Определение парциальных давлений при расшифровке масс-спектров состоит в решении системы линейных уравнений, составленных в предположении, что масс-спектр смеси получен наложением масс-спектров отдельных компонентов:

$$U_x = \sum_{i=1}^n U_{x_i} = \sum_{i=1}^n K_{x_i} \cdot p_i, \quad (3.4)$$

где U_x – амплитуда пика в масс-спектре газовой смеси, соответствующего массовому числу x ; U_{x_i} – амплитуда пика, соответствующего массовому числу x , в масс-спектре i -го газа; p_i – парциальное давление i -го газа; n – число компонентов в смеси газов; K_{x_i} – коэффициент чувствительности масс-спектрометра по i -му газу для массового числа x :

$$K_{x_i} = \beta_{x_i} \cdot K_i,$$

где K_i – коэффициент чувствительности масс-спектрометра по основному пику i -го газа; β_{x_i} – относительная интенсивность пика, соответствующего массовому числу x , в масс-спектре i -го газа.

В расчетах удобно пользоваться коэффициентом относительной чувствительности масс-спектрометра по разным газам $C_i = K_i/K_0$, где K_0 – коэффициент чувствительности по основному пику опорного газа (обычно азота или аргона). Значения C_i для двух типов масс-спектрометров приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Коэффициенты относительной чувствительности масс-спектрометров (C_i) и вакуумметра полного давления (φ_i)

Тип прибора	Газ									
	H ₂	He	CH ₄	H ₂ O	Ne	N ₂	CO	O ₂	Ar	CO ₂
статический с магнитным отклонением	0,46	0,17	0,84	1,05	0,25	1	1,08	0,83	1,3	1,1
динамический резонансный	0,45	0,21	0,67	0,65	0,3	1	1,1	0,7	1,2	1,37
ионизационный вакуумметр	0,43	0,15	0,67	0,65	0,26	1	1,1	0,86	1,4	1,3

Подставив в уравнение (3.4) выражение для K_{x_i} , получим

$$U_x = K_0 \sum_{i=1}^n C_i \cdot p_i \cdot \beta_{x_i}. \quad (3.5)$$

Система уравнений (3.5) не имеет решений для случая $i > x$, т.е. когда число газов в смеси превышает число пиков в спектре; имеет единственное решение при $i = x$ и несколько решений при $i < x$. Последний случай наиболее часто встречается на практике, что приводит к некоторой неопределенности в получаемых результатах.

Задача усложняется, если в системе присутствуют пары углеводородов или других органических соединений. Даже простейшие из них имеют большое количество пиков в индивидуальном масс-спектре, например метан – 9 пиков, этан – 10, диффузионное масло – 19 и т.д. В общем случае расшифровка такого масс-спектра невозможна.

Для решения системы уравнений (3.5) необходимо знать значения коэффициента чувствительности масс-спектрометра по опорному газу K_0 и коэффициентов чувствительности по всем газам смеси K_i . Для этого перед измерениями проводится градуировка масс-спектра по эталонным смесям газов. Этот метод определения парциальных давлений наиболее точен. Он позволяет выполнять прямые измерения, не используя манометры для измерения полных давлений, которые в свою очередь вносят неопределенность в измерения.

Однако определение коэффициентов чувствительности по опорным газам существенно увеличивает общее время измерений. Поэтому обычно проводят несколько упрощенную процедуру, заключающуюся в одновременном измерении полного давления в азотном эквиваленте и снятии масс-спектра. В этом случае измеряется неабсолютным вакуумметром (ионизационным) полное давление в азотном эквиваленте p_0 . Парциальное давление k -го газа находится из уравнения

$$p_k = p_0 \cdot \frac{U_k}{\sum_{i=1}^n U_i \cdot \varphi_i / C_i}, \quad (3.6)$$

где U_i – амплитуда основных пиков i -х газов; φ_i – коэффициент относительной чувствительности вакуумметра по i -му газу.

Для «чистых» вакуумных систем существуют эмпирические уравнения, позволяющие рассчитать величины U_i . Для омегатронного масс-спектрометра они приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Расчетные амплитуды основных пиков газов

Газ	Обозн.	Уравнение
Водород	H ₂	$U_{H_2} = 1,07U_2 - 1,34 \cdot 10^{-2}U_{16} - 1,1 \cdot 10^{-2}U_{18}$
Гелий	He	$U_{He} = U_4$
Метан	CH ₄	$U_{CH_4} = 2,55U_{15}$
Вода	H ₂ O	$U_{H_2O} = 1,28U_{18}$
Неон	Ne	$U_{Ne} = 1,1U_{20} - 0,16U_{40}$
Азот	N ₂	$U_{N_2} = 14,9U_{14} - 2,61U_{16} - 0,1U_{28} + 1,2 \cdot 10^{-2}U_{44}$
Оксись углерода	CO	$U_{CO} = 1,17U_{28} - 14,6U_{14} + 2,55U_{15} - 0,14U_{44}$
Кислород	O ₂	$U_{O_2} = 1,1U_{32} - 1,1 \cdot 10^{-3}U_{18}$
Аргон	Ar	$U_{Ar} = 1,15U_{40}$
Двуокись углерода	CO ₂	$U_{CO_2} = 1,28U_{44}$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

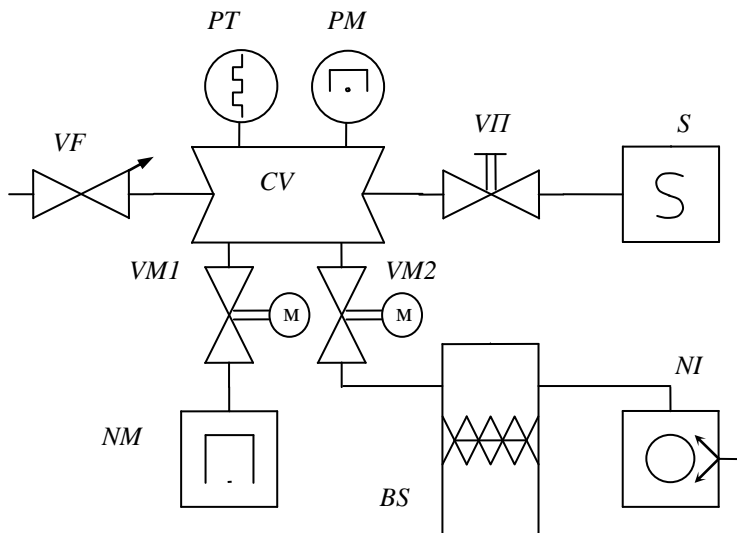
Вакуумная система

Принципиальная схема лабораторной установки показана на рис. 3.3. Откачиваемый объем системы (камера CV) снабжен масс-спектрометрическим преобразователем – омегатроном S, подключаемым к камере через клапан VII с ручным приводом. Высоковакуумная откачка производится магнитным электроразрядным насосом NM, снабженным затвором VM1 с электроприводом. Для предварительной откачки системы используется механический вращательный насос NI (линия централизованной форвакуумной откачки лаборатории). Отсекается линия предварительной откачки затвором VM2. Сорбционная ловушка BS используется для улавливания паров масла в линии предварительной откачки.

Регистрация полного давления в системе осуществляется двумя вакуумметрами:

- низковакуумным тепловым *PT*;
- высоковакуумным магнитным электроразрядным *PM*.

Натекатель *VF* используется для напуска в систему пробных газов.



Р и с. 3.3. Принципиальная схема вакуумной системы лабораторной установки

Измеритель парциальных давлений

Измеритель парциальных давлений омегатронный (ИПДО) предназначен для определения состава и парциальных давлений компонентов остаточных газов в высоковакуумных системах и электровакуумных приборах. Прибор рассчитан на работу с датчиком – омегатроном РМО-4С.

Основные технические характеристики ИПДО:

- наибольшее рабочее давление – $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па;

- наименьшее регистрируемое парциальное давление $(3-7) \cdot 10^{-9}$ Па (для аргона);
- диапазон регистрируемых масс от 1 до 250 а.е.м.

Разрешающая способность прибора $M/\Delta M$: на уровне 1% амплитуды пика (над уровнем фона) – примерно $1900/M$, т.е. разрешаются массы от $M = 1$ до $M = 43$; на уровне 50% амплитуды пика – примерно $4000/M$, т.е. разрешаются массы от $M = 1$ до $M = 63$.

Измеритель парциальных давлений состоит из следующих конструктивных частей: измерительного блока, выносного блока усилителя, электронного самопишущего потенциометра, магнита, датчика. В состав измерительного блока входят: усилитель электрометрический, генератор, блок питания, индикатор.

Датчик омегатронный подсоединяется к исследуемой вакуумной системе, обеспечивающей необходимую величину остаточного давления для работы прибора.

Постоянный магнит, создающий в датчике магнитное поле $B = 0,39$ Тл, установлен на магнитоюстировочном устройстве.

Электрометрический усилитель постоянного тока служит для усиления и измерения ионных токов датчика. Диапазон измеряемых токов от $1 \cdot 10^{-13}$ до $3 \cdot 10^{-10}$ А разделен на несколько поддиапазонов. В основу работы усилителя положен принцип измерения слабых токов по величине падения напряжений на известном сопротивлении. Постоянная времени усилителя (на уровне 0,7 по амплитуде) не превышает 50 мс при входном сопротивлении $R_{ВХ} = 10^{12}$ Ом и 5 мс при $R_{ВХ} = 10^{11}$ Ом. Усилитель имеет отрицательную обратную связь по напряжению для компенсации постоянной составляющей фонового сигнала. Общий коэффициент усиления примерно 2000.

Генератор высокой частоты (25 кГц – 6,2 МГц) предназначен для создания переменного электрического поля в датчике и имеет устройство для автоматической развертки по частоте при получении спектра масс. Выходное напряжение генератора регулируется не менее чем от 0,2 до 2 В на частоте 25–515 кГц и от 0,4 до 4 В в секторах 1,5; 2 и 6 МГц. Неравномерность частотной характеристики не превышает 1 дБ.

Блок питания обеспечивает питание датчика постоянными напряжениями и стабилизацию тока луча электронов.

Индикация спектра масс производится по стрелочному прибору, на экране электронно-лучевой трубки, а также путем записи на электронном самопишущем потенциометре.

ЗАДАНИЯ

Включение установки

Включение установки и все последующие операции на лабораторном вакуумном стенде проводятся под наблюдением преподавателя и персонала лаборатории.

Включить питание стенда, открыть водяное охлаждение насоса, установить диапазон измерений теплового вакуумметра по самой «грубой» шкале, включить питание теплового вакуумметра.

Задание 1

1.1 Предварительная откачка вакуумной системы

Включить низковакуумный насос *NI* (по указанию преподавателя низковакуумная откачка может выполняться с помощью централизованной форвакуумной системы лаборатории).

Провести предварительную откачку камеры *CV*, открыв затвор *VM2* (нажать на пульте левую кнопку под изображением вентиля). Контролируя давление по вакуумметру *PT* и постепенно переключая вакуумметр на более чувствительные шкалы, откачать вакуумную камеру до давления 2–5 Па (15–20 делений на самой чувствительной шкале). Снять временную зависимость $p(t)$ низковакуумной откачки.

Проверить остаточное давление в насосе *NM*, открыв затвор *VM1*. Убедиться, что давление в системе соответствует минимальному давлению запуска высоковакуумного насоса.

По полученным данным построить график низковакуумной откачки системы $p(t)$.

1.2 Высоковакуумная откачка

Включить блок питания магнитного электроразрядного насоса *НМ* (нажать на пульте левую кнопку под изображением блока питания). Пусковой режим магнитного электроразрядного насоса может длиться от несколько минут до десятка, сопровождается высоким начальным током разряда и пониженным напряжением (нормальное рабочее напряжение около 7 кВ).

По достижении давления 1Па отделить форвакуумный тракт от объема, закрыв вентиль *VM1* (нажать правую кнопку под изображением вентилля на пульте). Снять временную зависимость $p(t)$ высоковакуумной откачки.

Включить вакуумметр *РМ* на пульте стенда. Откачать объем до давления 0,1–0,01 мПа, соответствующего 25–45 делениям шкалы вакуумметра *РМ*. Продолжить измерение зависимости $p(t)$.

Убедившись, что объем откачан, **после разрешения и под контролем преподавателя**, открыть клапан омегатрона *VII*, стараясь не качнуть лампу. Продолжить откачку до давления 0,1–0,01 мПа.

По полученным данным построить график высоковакуумной откачки системы $p(t)$.

Задание 2

2.1. Подготовка измерительной установки

Поставить органы управления ИПДО в исходное положение:

- тумблер «Катод» – в нижнее положение;
- ручку «Ток луча» – в крайнее левое;
- тумблер «10мА–30мА» – в положение «10мА»;
- установить ручной режим развертки частоты, нажав кнопку «Ручн.»;
- поставить развертку частоты в начальное состояние, нажав кнопку «Сброс»;
- ручку «Напряжение ВЧ» поставить в среднее положение;
- переключатель «Пределы измерений» поставить на самую «грубую» шкалу ($3 \cdot 10^{-10}$).

Положение остальных органов управления может быть любым.

2.2. Включение и регулировка измерительной установки

Включить питание блоков: тумблер «Сеть» на блоке питания; индикаторный блок – тумблер «Вкл.»; электрометрический усилитель – переключатель «Сеть вкл», а через 5 мин – в положение «Измерение».

Дать прибору прогреться 20–30 мин.

Произвести следующую предварительную регулировку генератора. Установить диапазон изменения амплитуды ВЧ-напряжения, поставив тумблер вольтметра в положение «2,5 В». Установить шкалу ручкой «Частота» на нулевую отметку. Плавным вращением ручки «Установка нулевых биений» добиться нулевых биений, при этом показания вольтметра резко падают до нуля.

Настроить индикатор. Вращая ручки «Яркость», «Смещение Х», «Смещение Y», получить луч на экране индикатора на нулевой отметке масштабной сетки индикатора. Работать с тубусом при минимальной яркости луча. При появлении на экране сигнала (пика) яркость луча автоматически увеличивается.

Настроить электрометрический усилителя ионного тока. Ручкой «Установка нуля» установить нулевой уровень на выходе электрометрического усилителя на пределе « $1 \cdot 10^{-13}$ » и вновь установить более «грубую» шкалу.

Установить напряжение улавливающих пластин 0,25 В.

Прибор готов к работе и можно приступать к проведению измерений.

Задание 3

3.1. Включение датчика РМО

С разрешения преподавателя включить тумблер «Катод». **(Внимание: включение катода при закрытом кране омегатрона или без откачки приводит к перегоранию катода!)** В приборе ИПДО ток луча регулируется от 1 до 25 мкА. В диапазоне давлений 1–0,07 мПа ($1 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст.) рекомендуется установить ток луча около 2 мкА. От величины тока луча зависит чувствительность прибора.

При необходимости проверить юстировку датчика в магнитном поле. Для этого тумблер «Ток диафрагмы» – «Напряжение улавли-

вающих пластин» перевести в положение «Ток диафрагмы» для измерения тока электронов на диафрагму. Вращая ручку «Ток луча», проверить выполнение следующих условий:

ток луча – 2 мкА;

ток диафрагмы – 10–80 мкА (минимум настройки);

ток улавливающих пластин равен нулю (проверяется при нажатой кнопке «Ток улавливающих пластин»).

Указанное распределение токов должно соответствовать минимальному току ионного пучка, существующему в датчике при включенном высокочастотном напряжении.

3.2. Измерение спектра в режиме ручной развертки

В начале работы целесообразно просмотреть полный спектр масс анализируемых газов на экране индикатора – это дает представление о качественной картине состава газа.

Для настройки на пики ионных токов вручную:

- установить на усилителе переключатель «Постоянная времени» в положение «Меньше»;
- ввести высокочастотное напряжение 1 В на частоте 100 кГц.
- переключатель усилителя «Пределы измерений» поставить в такое положение, при котором фоновый ток составляет 1–10% шкалы (целесообразно установить предел от $1 \cdot 10^{-11}$ до $3 \cdot 10^{-12}$).

Затем, вращая ручку генератора «Частота», следует найти искомую составляющую спектра масс по максимуму показаний стрелочного прибора.

Провести калибровку чувствительности индикатора при помощи ручки «Усиление Y». Пройдя непрерывный спектр частот от 25 до 515 кГц, вращением ручки «Частота» настроиться на максимальный пик в спектре и отрегулировать усиление так, чтобы отклонение луча по вертикали соответствовало по масштабной сетке показаниям стрелочного прибора электрометрического усилителя.

При измерении спектра масс анализируемых газов вручную проходит весь спектр частот и фиксируются значения амплитуд ионных пиков с соответствующими им значениями частот.

Задание 4

4.1. *Определение резонансных частот и массовых чисел*

При расшифровке спектра необходимо знание резонансных (циклотронных) частот пиков ионных токов отдельных массовых чисел. Для этого требуется либо точное знание индукции магнитного поля и расчет частот по формуле $\omega_c = qB/m$, либо экспериментальное определение резонансной частоты ионов известной массы. Такими **реперными (опорными) массами могут служить** $M=18$ и $M=17$ (ионы воды H_2O^+ и OH^+), всегда присутствующие в необезгаженной вакуумной системе. Их соседние пики следует искать в области частот 0,30–0,25 МГц. Пик $M=18$ при этом примерно в три раза больше по амплитуде пика $M=17$.

Для нахождения остальных резонансных частот отдельных массовых чисел можно воспользоваться соотношением $\omega_c \cdot M = C$, где величина C сначала определяется для известного пика $M=18$.

4.2. *Автоматическая запись спектра*

Для снятия спектра масс с автоматической записью на электронном потенциометре при полосе обзора 100% (полный диапазон частотной развертки) перевести переключатель усилителя «Постоянная времени» в положение «Больше», установить шкалу генератора на нулевую отметку, переключатель «Время развертки» – в положение «200».

Включить тумблер «Вкл – диаграмма» электронного потенциометра и нажать кнопку «Пуск» генератора. Предел измерения электрометрического усилителя должен быть выбран в соответствии с ожидаемыми амплитудами пиков в спектре масс. Для остановки автоматической развертки генератора в любой желаемой точке нажать кнопку «Стоп». При повторном ее нажатии развертка будет продолжаться.

После завершения автоматической записи спектра масс на электронном потенциометре предъявить спектрограмму преподавателю.

Нанести на масс-спектр значения массовых чисел для каждого пика.

Вычислить значения разрешающей способности омегатрона для различных массовых чисел. Исследовать влияние амплитуды ВЧ-напряжения на разрешающую способность и чувствительность омегатрона.

После согласования результатов с преподавателем приступить к выключению установки.

Выключение установки

Выключение установки производится с разрешения и под контролем преподавателя.

Выключение измерителя парциальных давлений:

- ручку «Ток луча» перевести в крайнее левое положение;
- тумблер «Катод» – в нижнее положение;
- переключатель «Пределы измерений» – на самую «грубую» шкалу ($3 \cdot 10^{-10}$);
- тумблер на блоке питания из положения «Измерение» – в положение «Сеть выкл»;
- выключить все остальные тумблеры «Сеть».

Выключение вакуумного стенда:

- закрыть клапан омегатрона *ВП*;
- выключить вакуумметр *РМ*;
- перекрыть затвор *ВМ1*;
- отключить блок питания насоса *НМ*;
- выключить вакуумметр *РТ*;
- отключить питание стенда, закрыть водяное охлаждение.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен содержать:

- 1) принципиальную схему вакуумной системы лабораторного стенда в условных графических изображениях;
- 2) временную диаграмму откачки вакуумной системы установки;
- 3) спектр масс на диаграммной ленте с надписанными значениями частот;
- 4) измеренную величину полного давления в системе;

- 5) запись режима работы омегатрона;
- 6) таблицу расчета компонентного состава остаточных газов;
- 7) таблицу расчета парциальных давлений;
- 8) зависимость разрешающей способности омегатрона от массового числа для выбранного режима работы прибора.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. Чем определяется массовый состав остаточного газа в вакуумной системе?
2. Объясните принцип действия масс-спектрометрических преобразователей.
3. Каковы основные характеристики масс-спектрометров?
4. Каков принцип действия омегатронного датчика парциальных давлений?
5. Что такое индивидуальный масс-спектр газа?
6. В чем состоит калибровка масс-спектрометра?
7. В чем заключается расшифровка экспериментального спектра?
8. Как производится расшифровка спектра с применением вакуумметра полных давлений?
9. Перечислите основные элементы масс-спектрометра, каково их назначение?
10. Как происходит развертка по массам?
11. Объясните зависимость разрешающей способности датчика от массы иона.
12. Какие газы можно использовать в качестве «реперных» при расшифровке спектра?

РАБОТА 4

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНИКИ ТЕЧЕИСКАНИЯ

Цель – ознакомление с понятием герметичности вакуумных систем; изучение методов и техники течеискания в вакуумных системах; освоение методики работы с гелиевым течеискателем на базе статического масс-спектрометра.

ВВЕДЕНИЕ

Герметичность вакуумных систем

Техника течеискания – область техники, направленная на выявление нарушений герметичности, связанных с наличием течей (*течь* – канал или пористый участок в элементах конструкций). Понятие герметичности возникает тогда, когда ведется откачка системы до заданного давления. *Герметичность* вакуумной системы – это свойство всей системы или ее элементов и их соединений, исключающее проникновение через них газообразных (или жидких) веществ. Так, **достижение предельного остаточного давления в вакуумных системах в значительной степени зависит от их герметичности**. Герметичная вакуумная система должна обеспечить настолько малое проникновение газа (*натекание*), чтобы им можно было пренебречь в рабочих условиях. Очевидно, что при этом должно выполняться следующее соотношение:

$$p_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{ГВ}} + Q_{\text{Т}}}{S} \leq p_{\text{раб}}, \quad (4.1)$$

где $p_{\text{пр}}$ – предельное остаточное давление в системе, Па (1.3); S – *быстрота откачки* насоса при предельном давлении, м³/с; $Q_{\text{ГВ}}$ – суммарный *поток газовыделения*, Па·м³/с; $Q_{\text{Т}}$ – суммарный *поток натекания* через все течи, Па·м³/с; $p_{\text{раб}}$ – заданное рабочее давление в системе, Па. Для обеспечения эффективного использования средств откачки необходимо обеспечить предельное давление: $p_{\text{пр}} \leq 0,1 p_{\text{раб}}$. Тогда допустимый газовый поток натекания, в случае хорошо обезгаженной системы ($Q_{\text{ГВ}} \ll Q_{\text{Т}}$), будет определяться:

$$Q_{\text{Т}} \leq 0,1 p_{\text{раб}} \cdot S. \quad (4.2)$$

В реальных случаях поток газовыделения не намного меньше суммарного потока натекания через течи. Вообще говоря, требования по величинам потоков натекания и газовыделения должны быть едиными, но удовлетворять им можно в определенной последовательности. **Наличие течей и величина потока натекания определяют пригодность системы для дальнейшего использования** и поэтому должны контролироваться непосредственно при сборке системы или после каждой ее разгерметизации. В то же время уменьшение потока газовыделения можно проводить и позднее, путем вакуумной температурной тренировки системы.

Абсолютно герметичных вакуумных систем не бывает. Таким образом, задача состоит в том, чтобы добиться минимального суммарного потока натекания. Для динамических вакуумных систем, работающих под непрерывной откачкой, предельно допустимый поток натекания определяется из уравнения (4.2). **Природа течей может быть самой разной:** трещины и поры в стенках камер, неплотности во фланцевых соединениях, сварных швах и т.п. В сверхвысоковакуумных системах поиск течей затруднен вследствие малых величин потоков натекания.

Течеискание

Собственно *течеисканием* называется процесс обнаружения течей. Экспериментальное определение величины суммарного потока натекания может быть проведено **методом постоянного объема (накопления)** при отключении насосов от вакуумной системы. При этом в системе наблюдается рост давления, вызванный входящими потоками натекания и газовыделения (рис. 4.1). Анализ полученной зависимости $p(t)$ позволяет не только установить наличие газовыделения и натекания (нелинейная и линейная части зависимости), но и оценить их величины. Суммарный поток газовой нагрузки определяется углом наклона касательной, проведенной к зависимости давления от времени в момент отключения насосов от вакуумной системы.

Для определения потока натекания необходимо: установить момент времени t , в который начинается близкое к линейному изменение давления в системе (при этом устанавливается равновесный поток газовыделения и дальнейшее повышение давления в системе

происходит только вследствие натекания); измерить давление p_1 , через интервал времени Δt измерить давление p_2 . Поток натекания Q_T в этом случае определяется по выражению

$$Q_T = V \cdot \Delta p / \Delta t, \quad (4.3)$$

где V – объем вакуумной системы (камеры); $\Delta p = p_2 - p_1$.

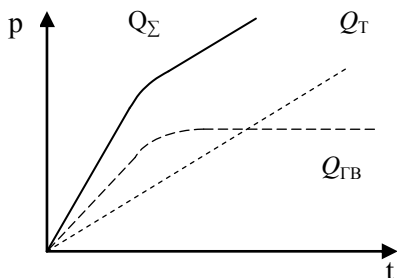


Рис 4.1 Динамика роста давления в отключенной вакуумной системе, связанного с различными источниками газа:

$Q_{ГВ}$ – газовыделение;

Q_T – натекание;

Q_Σ – суммарный поток

Для определения места течей разработано несколько методов течеискания. Наиболее широкое распространение в экспериментальной физике получил **метод пробного газа**. После получения вакуума в испытуемом объеме место, проверяемое на наличие течи, обдувается пробным газом, который вместо воздуха начинает поступать в этот объем. Изменение состава остаточных газов в вакуумной системе можно зарегистрировать с помощью вакуумметра, показания которого зависят от рода газа, или настроенного на пробный газ *масс-спектрометра*, прибора для разделения ионизированных молекул или атомов вещества по их массам. Для предотвращения повышения давления проверяемый объект должен находиться под непрерывной откачкой.

В откачиваемой системе с негерметичной оболочкой разность показаний вакуумметра при изменении давлений пробного газа и воздуха

$$\Delta \alpha = \alpha_{\Pi} - \alpha_{В} = \frac{Q_{\Pi}}{K_{\Pi} S_{\Pi}} - \frac{Q_{В}}{K_{В} S_{В}} = \frac{Q_{В}}{K_{В} S_{В}} \left(R \frac{Q_{\Pi} S_{В}}{Q_{В} S_{\Pi}} - 1 \right), \quad (4.4)$$

где $\alpha_{В}$ и α_{Π} – показания вакуумметра по воздуху и пробному газу; $Q_{В}$ и Q_{Π} – потоки воздуха и пробного газа; $S_{В}$ и S_{Π} – быстрота откачки объема по воздуху и пробному газу; $K_{В}$ и K_{Π} – *чувствительности* по воздуху и пробному газу; R – *относительная чувствительность* к пробному газу.

Для получения максимального сигнала необходимо выбрать пробный газ так, чтобы произведение $R(Q_{\Pi}S_{\text{В}})/(Q_{\text{В}}S_{\Pi})$ максимально возможно отличалось от единицы (4.4). Для того чтобы соотношение $S_{\text{В}}/S_{\Pi}$ сильнее отличалось от единицы, нужно использовать насосы, быстрота откачки которых существенно зависит от рода газа. Так, при определении герметичности вакуумной системы, откачиваемой пароструйным насосом, замещение воздуха на аргон или гелий вызывает 50-процентное увеличение показаний ионизационного манометра.

Масс-спектрометрический способ течеискания

Любой из масс-спектрометров может быть использован при течеискании в том случае, если натекающий через течи газ (или смесь газов) заменить на пробный. В этом случае **можно настроить масс-спектрометр на регистрацию только пробного газа, массовое число которого известно.**

При использовании масс-спектрометра для регистрации пробного газа учитывается разность показаний от пробного газа и фоновое сигнала, определяемого парциальным давлением пробного газа в воздухе $\Delta\alpha = \alpha_{\Pi} - \alpha_{\text{ф}}$. Разность показаний будет равна

$$\Delta\alpha = \frac{Q_{\Pi} - Q_{\text{ф}}}{K_{\Pi}S_{\Pi}}, \quad (4.5)$$

где $Q_{\text{ф}}$ – фоновый поток пробного газа, содержащегося в атмосферном воздухе. Масс-спектрометрический метод обладает самой высокой чувствительностью. Уменьшение быстроты откачки системы S_{Π} (см. (4.5)) позволяет повысить чувствительность метода течеискания. Минимальные течи, которые можно обнаружить масс-спектрометром, равны $10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Однако возможности такого способа течеискания ограничены. В первую очередь это связано с необходимостью получения в системе вакуума, достаточного для нормальной работы масс-спектрометра ($< 10^{-2} \text{ Па}$), что не всегда возможно при начальной сборке системы. Кроме того, данный способ не позволяет осуществлять проверку форвакуумной части системы.

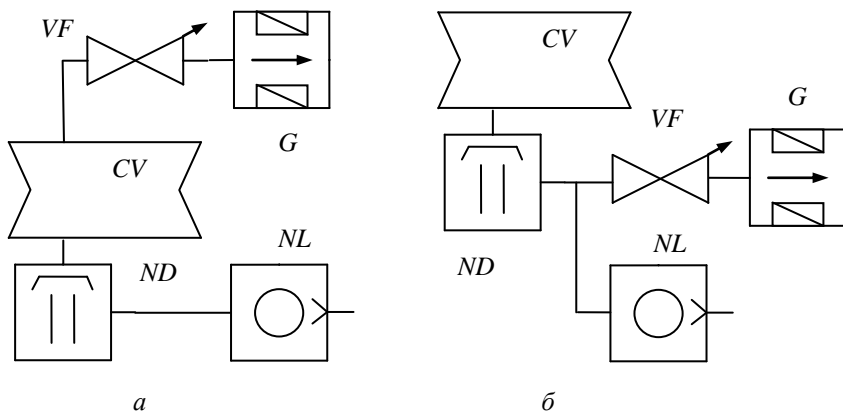
С другой стороны, требования высокой разрешающей способности и высокой чувствительности для всех масс-спектрометров про-

тиворечат друг другу. Для измерения малых потоков натекания необходимо иметь высокую чувствительность масс-спектрометра и, следовательно, пониженную разрешающую способность.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Течеискатели

Масс-спектрометрический метод успешно применяется в случае подключения к вакуумным системам специальных приборов или устройств для обнаружения течей – *течеискателей*. Течеискатели, в систему регистрации пробного газа которых включены масс-спектрометры, называются *масс-спектрометрическими*. В их составе присутствует собственная автономная система откачки для обеспечения рабочих условий в масс-спектрометрической камере.



Р и с. 4.2. Схемы испытаний на герметичность с помощью течеискателя:

G – течеискатель; *CV* – вакуумная камера; *ND* – насос диффузионный; *NL* – насос механический; *VF* – клапан-натекатель

Течеискатель может непосредственно подключаться к испытываемому объекту (рис. 4.2, *a*) вакуумной системы, когда объем отбираемого в течеискатель газа достаточен для создания в анализаторе предельно допустимого давления (максимальная чувствитель-

ность). При подключении по второй схеме (рис. 4.2, б) обеспечивается максимальный отбор газа в течеискатель и наиболее высокая чувствительность, с учетом повышения давления отбираемого газа, в том числе и пробного, на выходе насоса.

Основным пробным газом, применяемым при работе с масс-спектрометрическими течеискателями, является гелий, малая молекулярная масса и низкая сорбционная способность которого обеспечивают хорошее проникновение через малые течи, а инертность делает безопасным в применении. Гелий в весьма малых количествах содержится в атмосферном воздухе и продуктах газовойделения, так что фоновый сигнал небольшой. Массовое число иона гелия равно 4 а.е.м. и относительно сильно отличается от ближайших к нему соседних массовых чисел (пиков) в спектре (водород H_3^+ , углерод C_{12}^{++}). Это позволяет значительно снизить разрешающую способность масс-спектрометра.

Серийные масс-спектрометрические течеискатели настроены на индикацию гелия и носят название гелиевых. В них обычно используются *масс-спектрометры с магнитным отклонением*, в которых ускоренные ионы с разными массовыми числами под действием магнитного поля движутся по различным круговым траекториям. Магнитный масс-спектрометр для регистрации ионов гелия прост, малогабаритен и может быть сделан с большой чувствительностью (до $7,5 \cdot 10^{-6}$ А/Па).

Методика течеискания

Важнейшей характеристикой любого течеискателя является *чувствительность*, определяемая как отношение изменения сигнала течеискателя к вызывающему его изменению потока пробного газа через течи. Минимальное регистрируемое течеискателем количество или поток пробного газа называется *порогом чувствительности*. Однако при измерении потоков натекания в реальных системах, когда оно проводится в условиях газовойделения, наличия многих течей и динамической откачки, величина минимально регистрируемого потока течи $Q_{\text{мин}}$ не определяется только параметрами течеискателя, а зависит от методики проведения испытаний. Таким образом, следует говорить о чувствительности течеискания в целом.

Рассмотрим некую вакуумную систему, к которой подключен течеискатель. Система имеет газовыделение – поток $Q_{ГВ}$, течь – поток натекания Q_T и минимальную течь – поток $Q_{Тмин}$. Для эффективного течеискания необходимо обнаруживать малые течи на фоне больших.

При реальном поиске и обдуве «подозрительного» места на внешней стороне вакуумной камеры струей гелия в какой-то момент времени поток воздуха Q_T заменяется на поток гелия, попадающий в течеискатель. Однако гелий не может полностью вытеснить в течи воздух, следовательно, в течеискатель попадает воздушно-гелиевая смесь. И, по существу, течеискатель должен регистрировать изменение концентрации гелия. Способность течеискателя реагировать на изменение концентрации гелия в системе определяется газоаналитической чувствительностью

$$\beta = \frac{1}{C_K} \cdot \left(\frac{Q_{Тмин}}{Q_{ГВ} + Q_T} \right) = \frac{1}{C_K} \cdot \frac{Q_{Тмин}}{p_{пр} \cdot S}, \quad (4.6)$$

где C_K – поправочный коэффициент, отражающий неполное замещение воздуха в течи гелием.

Газоаналитическая чувствительность определяется стабильностью течеискателя, его избирательной способностью (чувствительностью) по гелию и конкретными условиями в данной вакуумной системе.

Современные течеискатели способны показывать наличие гелия в атмосферном воздухе; значение β может достигать величины 10^{-7} . Исходя из уравнения (4.6), можно записать, что минимальный поток натекания, измеряемый течеискателем в рассмотренном случае, составляет

$$Q_{Тмин} = C_K \cdot \beta \cdot p_{пр} \cdot S. \quad (4.7)$$

Помимо этого на чувствительность течеискания существенным образом влияют динамические процессы установления парциального давления в системе, то есть временные характеристики течеискания. Пусть в момент времени $t = 0$ в систему объемом V , не содержащую гелия, начинает поступать через течь поток гелия Q_{He} . Рост парциального давления гелия в системе описывается уравнениями:

$$V \frac{dp_{\text{He}}}{dt} = Q_{\text{He}} - p_{\text{He}} S_{\text{He}}, \quad p_{\text{He}}(t) = \frac{Q_{\text{He}}}{S_{\text{He}}} \left(1 - e^{-t/\tau} \right), \quad (4.8)$$

где S_{He} – быстрота откачки системы по гелию; $\tau = V/S_{\text{He}}$ – *постоянная времени течеискания*, характеризующая инерционность процесса течеискания.

Отсюда видно, что чем меньше S_{He} , тем больше предельное равновесное давления гелия в системе, равное $Q_{\text{He}}/S_{\text{He}}$, и тем быстрее реакция прибора на пробный газ. Таким образом, для увеличения чувствительности течеискания выгодно снижать быстроту откачки гелия. Однако при этом, после удаления источника гелия от места течи, снизится скорость падения парциального давления пробного газа в объеме, следовательно, увеличатся инерционность системы и время измерения. Видно, что факторы полного времени измерения и чувствительности противоречат друг другу.

Уравнения (4.8) записаны для случая, когда гелий подается на течь неограниченно долго, например, при калибровке. На практике при обдуве «подозрительных» мест это условие обеспечить нельзя (без применения метода «колпака»), и тогда, считая, что в момент t_1 прекращается подача гелия ($Q_{\text{He}} = 0$), можно записать зависимость давления гелия в системе от времени:

$$p_{\text{He}}(t) = \frac{Q_{\text{He}}}{S_{\text{He}}} \left(1 - e^{-t_1/\tau} \right) \cdot e^{-t/\tau}, \quad (4.9)$$

где t_1 – время обдувания течи гелием.

Обычно на практике время обдувания выбирается из условия $\tau \leq t_1 \leq 3\tau$, что обеспечивает достижение в объеме от 63 до 95% максимально возможного значения давления гелия.

Учет динамического процесса установления или изменения давления гелия в системе позволяет записать выражение (4.7) в виде

$$Q_{\text{T мин}} = C_{\tau} \cdot C_{\text{K}} \cdot \beta \cdot p_{\text{пр}} \cdot S, \quad (4.10)$$

где C_{τ} – уменьшение концентрации гелия в системе вследствие действительных временных соотношений. Уравнение (4.10) определяет чувствительность течеискания в случае реального поиска течей в вакуумных системах.

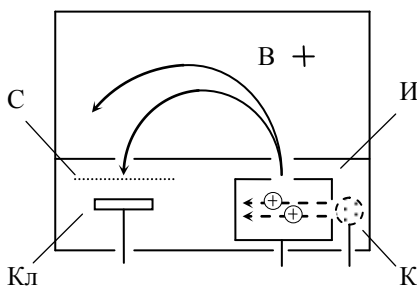
Принцип действия течеискателя

Течеискатель представляет собой высокочувствительный масс-спектрометр с магнитным отклонением, настроенный на регистрацию гелия, с автономной системой откачки.

Для проведения испытаний на герметичность вакуумным методом предварительно откачанный испытуемый объем соединяется с масс-спектрометрической камерой течеискателя и обдувается гелием (или помещается в чехол, заполненный гелием).

Наличие течи определяют по увеличению сигнала масс-спектрометра, вызываемому повышением парциального давления гелия в масс-спектрометрической камере.

Основным элементом течеискателя является масс-спектрометрическая камера, содержащая ионный источник и приемник ионов (рис. 4.3). Камера помещается между полюсами постоянного магнита.



Р и с. 4.3.

Масс-спектрометрическая камера течеискателя:

К – термокатод;

И – ионизатор;

Кл – коллектор ионов;

С – супрессорная сетка

Накаленный вольфрамовый катод ионного источника эмитирует электроны, которые ускоряются в электрическом поле между катодом и коробкой ионизатора. В камере ионизатора электроны сталкиваются с молекулами газа, поступающего в течеискатель из проверяемого объема, и вызывают их ионизацию.

Образовавшиеся ионы вытягиваются из камеры ионизации ускоряющим электрическим полем, действующим в направлении, перпендикулярном электронному пучку. Величина ускоряющего напряжения U , приложенного между камерой ионизатора И (рис. 4.2) и выходной диафрагмой, определяет энергию и соответственно скорость ионов: $(mv^2/2) = qU$, где q – заряд; m – масса и

v – скорость иона. Поток ионов через выходную диафрагму поступает в анализатор.

В анализаторе (анализатором здесь называется область масс-спектрометрической камеры, в которой ионы движутся от источника к коллектору ионов) **происходит пространственное разделение ионов по массам под действием постоянного магнитного поля**, направленного перпендикулярно направлению движения ионов и заставляющего их двигаться по круговым траекториям.

Если ион пересекает область однородного магнитного поля индукции B перпендикулярно направлению поля, то на него начинает действовать сила Лоренца $F = qvB$, которая перпендикулярна как магнитному полю, так и направлению движения иона. Эта сила вынуждает ион двигаться по круговой орбите, радиус которой r может быть определен из уравнения $(mv^2/r) = qvB$, откуда с учетом выражения для энергии иона получаем

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}. \quad (4.11)$$

При постоянных значениях B и U радиус траектории зависит от массового числа иона $M = m/q$. Таким образом, в магнитном поле происходит разделение ионного пучка на ряд отдельных лучей.

Анализатор масс-спектрометрической камеры течеискателя – 180-градусного типа. Траектории ионов в нем от ионного источника к приемнику ионов имеют вид полуокружностей. Анализатор такого типа обладает фокусирующим действием; ионы определенной массы, выходящие из источника расходящимся пучком, вновь собираются в сходящийся пучок в плоскости входной диафрагмы коллектора.

Изменением ускоряющего ионы напряжения U осуществляется настройка камеры на пик гелия.

Разрешающая способность масс-спектрометра зависит от размеров прибора (радиуса траектории) и расширения ионного пучка, происходящего в результате разброса ионов по энергиям и неоднородностей поля. Если d_1 и d_2 – ширина щелей на выходе из источника ионов и перед коллектором ионов, а δd – расширение ионного пучка в плоскости щели коллектора, то должно выполняться условие $d_2 \geq d_1 + \delta d$, при котором все ионы одного массового числа попадут во входную щель перед коллектором ионов.

Увеличение ширины щели d_1 приводит к повышению чувствительности прибора, однако это увеличение требует эквивалентного увеличения d_2 , что вызывает ухудшение разрешающей способности. Разрешающая способность выражается формулой $M/\Delta M = r/(d_1 + d_2 + \delta d)$, где ΔM – наименьшее различаемое массовое число. Поскольку для течеискателя необходимая разрешающая способность не превышает 4 а.е.м., ширина щелей и, следовательно, ионный ток и чувствительность течеискателя могут выбираться гораздо больше, чем у обычных анализаторов.

Чтобы на коллектор попадали только ионы гелия, обладающие полным запасом энергии, и отсеивались и задерживались рассеянные ионы, потерявшие часть своей энергии в результате соударения со стенками камеры или с нейтральными молекулами газа, и случайно попавшие на рабочую траекторию, перед коллектором помещают супрессорную систему (сетку). **Супрессорной системой создается тормозящее ионы электрическое поле, пропускающее только основные ионы гелия.**

Коллектор ионов соединен со входом электрометрического каскада усилителя постоянного тока. Для обеспечения высокой чувствительности регистрации предусмотрена электронная компенсация фоновых сигналов, дающая возможность регистрировать сигналы, вызываемые течами, на чувствительных шкалах выходного прибора блока измерения ионного тока. Выбор рабочей шкалы осуществляется в соответствии с уровнем флуктуаций фонового сигнала течеискателя и необходимой чувствительностью испытаний.

Градуировка течеискателя

Поскольку течеискатель снабжен собственной системой откачки, его можно отградуировать и использовать для прямых измерений скорости натекания.

Если минимальное регистрируемое давление гелия известно, то минимальный регистрируемый поток натекания в первую очередь определяется эффективной быстротой откачки гелия. Чувствительность течеискания зависит от того, какая доля молекул натекающего гелия попадет в камеру анализатора.

Для контроля чувствительности течеискателя служит калиброванная гелиевая течь «Гелит», обеспечивающая поступление фиксированного потока гелия через кварцевую диафрагму.

Градуировкой определяется цена деления шкалы выходного прибора течеискателя

$$A = Q_{\text{He}} / (\alpha_{\text{He}} - \alpha_{\text{ф}}), \quad (4.12)$$

где Q_{He} – поток гелия от калиброванной течи, $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$; α_{He} – установившийся сигнал при измерении потока калиброванной течи, мВ; $\alpha_{\text{ф}}$ – фоновый сигнал, мВ. Предельные возможности течеискателя, характеризующиеся минимальным регистрируемым потоком пробного газа:

$$Q_{\text{He}_{\text{мин}}} = 2 \cdot A \cdot \Delta\alpha_{\text{ф}}. \quad (4.13)$$

Здесь $\Delta\alpha_{\text{ф}}$ – амплитуда флуктуаций фонового сигнала, мВ. Минимальный обнаруживаемый поток через течь определяется значением и стабильностью фоновых гелиевых потоков в системе.

ТЕЧЕИСКАТЕЛЬ ГЕЛИЕВЫЙ – ТИ

Общие сведения

Гелиевый масс-спектрометрический течеискатель – ТИ – предназначен для испытаний на герметичность различных систем и объектов, допускающих откачку внутренней полости, а также заполненных гелием или смесью, содержащей гелий.

Течеискатель является универсальным прибором, рассчитанным на все виды контроля герметичности с применением гелия в качестве пробного газа.

Погрешность определения величины течи данным прибором не нормируется.

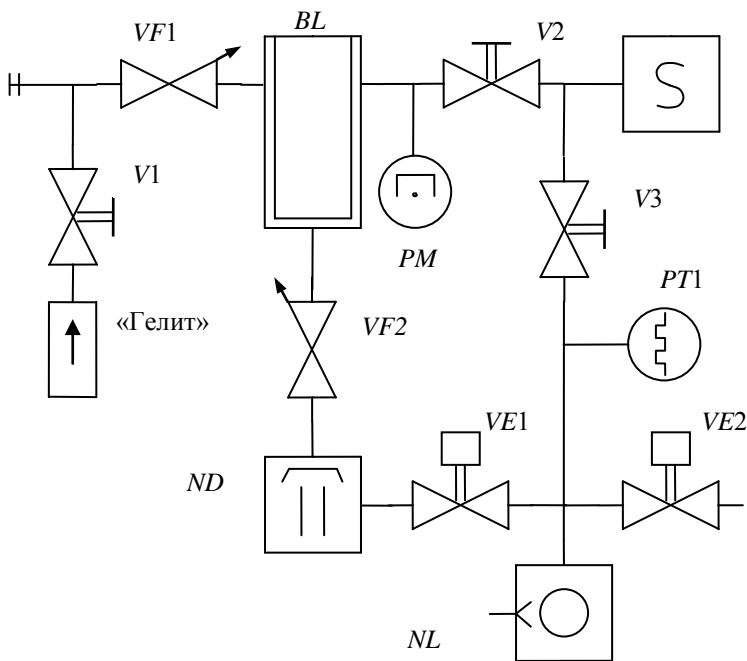
Минимальный регистрируемый поток гелия без дросселирования – не более $1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$, с дросселированием откачки – $6,6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ (*дросселирование откачки* – снижение эффективной быстроты откачки камеры анализатора).

Масс-спектрометрический течеискатель представляет собой вакуумную установку, состоящую из следующих основных частей:

- анализаторной части (масс-спектрометрической камеры с магнитом);
- электронных блоков измерения и питания;
- вакуумной системы.

Вакуумная система

Схема вакуумной системы течеискателя приведена на рис.4.4.



Р и с. 4.4. Схема вакуумной системы гелиевого масс-спектрометрического течеискателя

Минимальная измеряемая масс-спектрометром *S* величина парциального давления гелия составляет 10^{-10} Па. С целью обеспечения высокой чувствительности в течеискателе снижен уровень фоновых сигналов. Для этого вместо резиновых применены металлические уплотнения и использован диффузионный насос (*ND*) с

повышенной плотностью струи, что снижает противодиффузию гелия и увеличивает быстроту откачки.

Высоковакуумный насос *ND* работает в диапазоне давлений от $6,6 \cdot 10^{-4}$ до 3 Па. Быстрота откачки по воздуху (с ловушкой) не менее 10 л/с.

Предварительная откачка камеры масс-спектрометра (до 1 Па) осуществляется механическим насосом *NL* через линию байпасной (обходной) откачки, переключаемую клапаном *V3* с ручным приводом.

Для защиты масс-спектрометрической камеры и испытуемых объемов от замасливания над диффузионным насосом установлена ловушка (*BL*), охлаждаемая жидким азотом.

Клапан-натекатель *VF1* «Входной» – ручной, предназначен для регулирования потока газа, поступающего из испытываемого объема (или шупа) в масс-спектрометрическую камеру.

Клапан *V1* «Гелиевая течь» – ручной, открывается при проведении градуировки течеискателя по гелиевой течи «Гелит».

Клапан *V2* «Откачка камеры» – ручной, соединяющий масс-спектрометрическую камеру с откачной системой течеискателя. Наличие этого клапана обеспечивает возможность изоляции камеры (во время размораживания ловушки, вскрытия паромасляного насоса и т.п.).

Клапан *VF2* «Дросселирование откачки» – ручной, регулируемый (дросселирующий), предназначен для регулировки быстроты откачки масс-спектрометрической камеры паромасляным насосом и, следовательно, для изменения чувствительности течеискателя.

Клапан *VE1* «Откачка паромасляного насоса» – электромагнитный, автоматически закрывается в аварийном режиме и при отключении питания установки, изолируя высоковакуумный насос от тракта вспомогательной откачки.

Клапан *V3* «Байпасная откачка камеры» – ручной, соединяет масс-спектрометрическую камеру *S* при байпасной откачке с механическим насосом.

Клапан *VE2* «Напускной» – электромагнитный, предназначен для напуска воздуха в механический насос при выключении течеискателя, открывается автоматически с задержкой во времени относительно времени закрытия клапана *VE1*. Это необходимо для

предотвращения попадания атмосферного воздуха в горячий паромасляный насос.

Гелиевая течь «Гелит» представляет собой устройство, дающее непрерывный неизменный по величине поток гелия. Действие течи основано на диффузии гелия сквозь мембрану, изготовленную из плавленого кварца. Гелиевая течь обеспечивает возможность оценки чувствительности испытаний. В режиме градуировки течеискателя на входном фланце устанавливается заглушка. Входной клапан при этом полностью открывается.

Для индикации давления в высоковакуумной части установки и форвакуумной линии вакуумная система течеискателя содержит два вакуумметра:

1) тепловой термопарный (*PT*), предназначенный для индикации давления в форвакуумной линии в диапазоне от $1 \cdot 10^{-1}$ до 10 Па ($1 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст.);

2) магнитный электроразрядный (*PM*), предназначенный для индикации давления в высоковакуумном объеме в диапазоне от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-1}$ Па ($1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.), является датчиком системы вакуумной блокировки.

При превышении допустимого давления в камере масс-спектрометра срабатывает система блокировки и отключается накал катода ионного источника масс-спектрометра (сигнал «Плохой вакуум»). Для повторного включения накала катода необходимо нажать кнопку «Деблокировка», расположенную на панели управления.

Электронная система

В электронную систему течеискателя входит несколько функциональных частей, блоков, обеспечивающих работу вакуумной системы и анализирующего устройства течеискателя.

Блок измерения ионного тока масс-спектрометра состоит из электрометрического каскада усилителя постоянного тока, стрелочного, акустического и светового индикаторов, схем питания и компенсации фоновых сигналов. Шкала стрелочного прибора проградуирована в единицах напряжения и имеет несколько пределов измерения в соответствии с положением переключателя «Пределы измерения».

Для компенсации фоновых сигналов течеискателя в цепи обратной связи усилителя (коэффициент усиления по току 5000 без цепи обратной связи) вводится в обратной фазе по сравнению с сигналом регулируемое напряжение. Для обеспечения регулировки напряжения компенсации весь диапазон разбит на два поддиапазона, которые устанавливаются переключателем «Компенсация грубо». Плавная регулировка напряжения компенсации осуществляется потенциометром «Компенсация плавно».

Блок питания камеры содержит источник питания катода ионного источника со схемами стабилизации тока эмиссии и ограничения тока накала, а также источники ускоряющего, супрессорного и ионизирующего напряжений. Для снижения чувствительности течеискателя при индикации грубых течей предусмотрена возможность ступенчатого изменения тока эмиссии. Установка нужной величины тока эмиссии и выключение накала катода ионного источника осуществляется переключателем «Ток эмиссии».

В блок измерения давлений входят схемы питания, измерения и блокировки вакуумметрических преобразователей. Тумблер «Форвакуум – высокий вакуум» на панели управления коммутирует измерительный прибор из схемы измерения теплового преобразователя (форвакуум) в схему измерения разрядного тока магнитного электроразрядного вакуумметрического преобразователя.

После одного часа откачки механическим и паромасляным насосами с применением жидкого азота для охлаждения ловушки в высоковакуумном объеме течеискателя устанавливается давление 10^{-3} Па. При повышении давления до величины 10^{-2} Па или внезапном прорыве атмосферного воздуха в высоковакуумный объем течеискателя срабатывает вакуумная блокировка: отключается накал катода ионного источника масс-спектрометрической камеры.

При отключении сетевого напряжения автоматически перекрывается линия предварительного разрежения паромасляного насоса и напускается атмосферный воздух в механический насос.

ЗАДАНИЯ

Подготовка течеискателя к работе

Проверить исходное положение органов управления:

- все клапаны закрыты (ручки повернуты вправо до упора);
- выключатель питающей сети – в положении «Выкл»;
- тумблер «Нагреватель» – в нижнем положении;
- переключатель «Пределы измерения» – положении 30 В;
- переключатель «Компенсация» – в положении «Выкл»;
- переключатель «Ток эмиссии» – в положении **«Катод выключен»**;
- переключатель «Измерение» – в положении «Ток эмиссии»;
- тумблер «Форвакуум – высокий вакуум» – в положении «Форвакуум»;
- переключатель «ПМТ-4М» – в положении «Внутр».

Включение течеискателя и все последующие операции на установке проводятся под наблюдением преподавателя и персонала лаборатории.

Задание 1

1.1. Низковакуумная откачка

В ходе выполнения задания на каждом этапе проводить измерение зависимости $p(t)$ для построения диаграммы откачки.

Включить течеискатель, для чего переключатель питающей сети на панели течеискателя перевести в положение «Вкл». При этом должны начать работать механический насос и вентилятор паромасляного насоса, также должны загораться индикаторы включения сетевого напряжения на лицевых панелях блока измерения ионного тока, блока питания камеры и блока измерения давления. По указанию преподавателя проверить установку тока нагревателя ПМТ-4М, для чего на блоке нажать кнопку «Ток нагревателя ПМТ-4М» (записать показания).

Откачать форвакуумную линию до давления около 5 Па (0,03–0,05 мм рт. ст. по верхней шкале прибора измерения давления).

Провести форвакуумную откачку объема паромасляного насоса. На лицевой панели течеискателя нажать и отпустить кнопку клапана *VE1* («Откачка паромасляного насоса»), при этом должен загореться индикатор «Паромасляный насос – откачка». Откачать объем паромасляного насоса до давления 5 Па.

Последовательно откачать до давления 5 Па участки вакуумной системы течеискателя, получая требуемое давление на каждом участке, открывая клапаны *VF2* («Дросселирование откачки» (справа на боковой стенке), *V2* («Откачка камеры»), *VF1* («Входной клапан») и *V1* («Гелиевая течь») на лицевой панели течеискателя.

Закрыть клапаны «Откачка камеры» и «Гелиевая течь». Изолировать паромасляный насос, закрыв клапан «Дросселирование откачки».

Построить временную диаграмму откачки.

1.2. *Высоковакуумная откачка*

В ходе выполнения задания на каждом этапе проводить измерение зависимости $p(t)$ для построения диаграммы откачки.

Включить подогрев масла в диффузионном насосе (тумблер «Паромасляный насос – нагреватель» на лицевой панели установить в верхнее положение).

Через 30 мин прогрева насоса начать высоковакуумную откачку объема, открыв клапан *VF2* «Дросселирование откачки».

Включить высоковакуумный вакуумметр, установив тумблер «Форвакуум – высокий вакуум» в положение «Высокий вакуум». Откачать объем до давления около 0,003 Па (соответствует 5–20 делениям средней шкалы измерительного прибора).

Откачать гелиевую течь до давления 0,003 Па, открыв клапан *V1* «Гелиевая течь» (менее 5 мин) и затем закрыть клапан.

По указанию преподавателя залить в ловушку жидкий азот для вымораживания паров масла и предотвращения их попадания в камеру масс-спектрометра (заливку проводить только с лаборантом!).

Откачать камеру до давления не менее 0,003 Па, открыв клапан *V2* «Откачка камеры».

Построить временную диаграмму откачки.

Задание 2

Подготовка масс-спектрометра к работе

Отрегулировать нуль усилителя постоянного тока на всех шкалах потенциометром «Установка нуля». Отключить блокировку накала катода, нажав на панели кнопку «Деблокировка».

Перед включением накала катода ионного источника необходимо проверить, открыт ли клапан «Откачка камеры» и откачана ли камера масс-спектрометра до высокого вакуума (давление 0,003 Па). **(Включение накала при закрытом клапане приводит к перегоранию катода!)**

Подать на катод ионизатора напряжение. Переключатель «Измерение» установить в положение «Ток эмиссии», а переключатель «Ток эмиссии» – в положение «0,1 мА». Через 10–15 с стрелка прибора должна отклониться на середину шкалы. По мере обезгаживания камеры и снижения давления ток может быть увеличен.

Проверить установку величины ускоряющего и супрессорного напряжений, которые контролируются выходным прибором в соответствующих положениях переключателя «Измерение». Настройка прибора проводится по указанию преподавателя.

Величина ускоряющего напряжения равна 400 В. Супрессорное напряжение – 70 В, но, в зависимости от величины остаточного фона, может регулироваться (потенциометром) в пределах от 40 до 100 В и более.

Задание 3

Калибровка масс-спектрометра

Провести напуск пробного газа в вакуумную систему течеискателя и настроиться на «пик гелия»; на лицевой панели открыть клапан «Гелиевая течь» и после установления сигнала, изменяя напряжение ионизатора потенциометром «Ускоряющее напряжение», получить максимальное отклонение стрелки прибора усилителя тока, соответствующее максимальному току ионов гелия на коллекторе ионов. Закрыть клапан «Гелиевая течь».

Проверить, являются ли ионы, попадающие на коллектор при максимальном токе, ионами гелия. Для этого кратковременно подать гелий в камеру масс-спектрометра клапаном «Гелиевая течь». Если сигнал впоследствии не уменьшится, значит, это не «пик гелия», повторить настройку на «пик гелия».

Подобрать напряжение на супрессорной сетке так, чтобы ток, образуемый попаданием на коллектор ионов больших масс, был минимален, для чего потенциометр «Супрессорное напряжение» настроить на минимальное значение токового сигнала. После этого проверить настройку на «пик гелия».

Зафиксировать величину супрессорного напряжения и амплитудное значение сигнала ионного тока.

Задание 4

Определение минимального регистрируемого потока гелия и цены деления выходного прибора течеискателя

При закрытом клапане «Гелиевая течь» (остальные клапаны открыты) откачать течеискатель, удалив из него гелий.

Определить амплитуду флуктуаций фонового сигнала, установив наиболее чувствительную шкалу выходного прибора блока измерения ионного тока:

$$\Delta\alpha_{\text{ф}} = \left(\alpha_{\text{ф.макс}} - \alpha_{\text{ф.мин}} \right) / 2, \quad (4.14)$$

где $\Delta\alpha_{\text{ф}}$ – амплитуда флуктуаций, мВ; $\alpha_{\text{ф.макс, мин}}$ – максимальное и минимальное значения (отклонения) фонового сигнала, мВ.

Переключатель «Пределы измерения» установить в положение «30 В». Напустить гелий в камеру масс-спектрометра, открыв клапан «Гелиевая течь», и, выбрав удобную для измерений шкалу, определить амплитуду сигнала от гелиевой течи – $\alpha_{\text{т}}$, мВ.

Перекрыть поток гелия в камеру, закрыв клапан «Гелиевая течь», и определить амплитуду фонового сигнала – $\alpha_{\text{ф}}$, мВ.

Определить цену деления шкалы выходного прибора и минимальный поток гелия $Q_{\text{мин}}$, регистрируемый течеискателем, по формулам (4.12) и (4.13).

По заданию преподавателя выполнить градуировку течеискателя в режиме дресселирования откачки.

Зафиксировать полученные данные.

Выключение течеискателя

Выключение установки производится с разрешения и под контролем преподавателя.

Для выключения течеискателя необходимо:

- закрыть клапаны «Гелиевая течь» и «Входной», переключатель «Пределы измерений» установить в положение «30 В»;
- **выключить накал катода ионизатора**, установив переключатель «Ток эмиссии» в положение «Катод выключен»;
- закрыть клапан «Откачка камеры»;
- установить тумблер в положение «Форвакуум»;
- закрыть клапан «Дресселирование откачки»;
- выключить нагреватель паромасляного насоса (тумблер «Паромасляный насос – нагреватель» установить в нижнее положение);
- **через 30 мин**, после остывания насоса, выключить напряжение питающей сети, установив переключатель сети на лицевой панели в положение «Выкл».

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен содержать:

- 1) функциональную схему масс-спектрометра течеискателя;
- 2) вакуумную схему течеискателя;
- 3) временную диаграмму откачки течеискателя;
- 4) величину предельного остаточного давления в течеискателе;
- 5) экспериментально полученные $\Delta\alpha_F$, $\alpha_{F \text{ макс, мин}}$, α_T , α_F ;
- 6) найденные значения цены деления измерительного прибора и минимального регистрируемого потока гелия;
- 7) рассчитанную чувствительность течеискателя;
- 8) рассчитанное значение быстроты откачки по гелию, при условии, что $S_k = 0,5$.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. В чем заключается свойство герметичности вакуумной системы?
2. Чем определяется величина предельного потока натекания?
3. Что такое течеискание, какие существуют методы поиска течей?
4. На чем основан масс-спектрометрический способ течеискания?
5. Какой газ используется в качестве пробного и почему?
6. Что такое чувствительность течеискания?
7. Какие условия и режимы определяет постоянная времени течеискания?
8. Каковы устройство и принцип работы анализатора?
9. Какими особенностями обладает вакуумная система течеискателя?
10. Какие блоки входят в электронную систему течеискателя?
11. Каков принцип действия калиброванной течи «Гелит»?
12. Что регулируется клапаном «Дросселирование откачки»?
13. Для чего нужна градуировка течеискателя?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов Л. Н. Вакуумная техника: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2007.
2. Вакуумная техника: Справочник / Е. С. Фролов, В. Е. Минайчев и др.: Под общ. ред. Е. С. Фролова и В. Е. Минайчева. М.: Машиностроение, 1992.
3. Шестак В.П. Физические основы вакуумной техники: Учебное пособие. М.: МИФИ, 1991.
4. Шатохин В.Л. Технология вакуумных систем: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2000.
5. Шестак В.П. Метрологические аспекты физики вакуума: Учебное пособие. М.: МИФИ, 1983.
6. Уэстон. Дж. Техника сверхвысокого вакуума: Пер. с англ. М.: Мир, 1988.

СОДЕРЖАНИЕ

Работа 1. Моделирование вакуумной системы	3
Работа 2. Исследование характеристик высоковакуумного насоса	24
Работа 3. Исследование парциального состава остаточного газа	41
Работа 4. Изучение техники течеискания	61
Список рекомендуемой литературы	83

Вадим Леонидович Шатохин

Валерий Петрович Шестак

**ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА.
Лабораторный практикум**

Учебно-методическое пособие

Редактор Е.Г. Станкевич

Оригинал-макет подготовлен В.Л. Шатохиным

Подписано в печать 12.03.2010 Формат 60×84 1/16

Печ. л. 5,25. Уч.-изд. л. 5,25. Тираж 100 экз.

Изд. № 070–1 Заказ №

Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ».

Типография НИЯУ МИФИ.
115409, Москва, Каширское ш., 31.